Naturlehre

von

Dr. Alois Lanner,

k. k. Professor an der Staats-Oberrealschule in Innsbruck.

Mit 377 Figuren, einer Spectraltafel und 4 meteorologischen Kart
in Farbendruck.

Bearbeitet für die oberen Classen der Mittelschulen auf Grund der mit Erlass
hohen k. k. Ministeriums für Cultus und Unterricht vom 23. Februar 1900 veröffe
lichten 2. Auflage des Lehrplanes und der Instructionen für Gymnasien.



Wien, 1902.

Verlag der Jos. Roth'schen Verlagsbuchhandlung.

Inhaltsverzeichnis.

Einleitung.

Wir gelangen zu einer viel tieferen Erkenntnis der Naturkräfte und durch auch zu einer immer reicheren Ausbeute derselben für das Cultur-)en, wenn wir bei allen damit in Verbindung stehenden Vorgängen das lgemeine und Nothwendige dem Besonderen und Zufälligen gegenüber ehr in den Vordergrund treten lassen und aus dem Mannigfaltigen und echselvollen das Einheitliche und Gesetzmäßige herausgreifen.

Die Objecte, denen sich dabei unsere Aufmerksamkeit zuwenden muss, id theils die Körper als solche, theils auch die Vorgänge, die wir an ver- iedenen Körpern wahrnehmen. Wir können z. B. das Meerwasser selbst m Gegenstande einer Untersuchung machen, indem wir sein specifisches ewicht bestimmen und die Temperatur ermitteln, bei der es gefriert oder det. Andererseits können wir den Wellenschlag als solchen und die Er- heinung von Ebbe und Flut in ihrem Zusammenhang mit der Bewegung r Sonne und des Mondes studieren.

Wenn wir auf diesem Wege unsere Forschung allmählich über alle ten von Naturvorgängen ausdehnen, so finden wir bald, dass manche esetzmäßigkeiten uns immer und überall begegnen, während wir zu anderen st durch eine lange Reihe von Untersuchungen vorzudringen vermögen. ir können uns z. B. keinen Körper vorstellen, ohne ihm eine Ausdehnung ı Raume zuzuerkennen, und darum sagen wir, die „Ausdehnung" sei eine llgemeine Eigenschaft" der Körper. Wir werden uns indessen mit dieser genschaft als solcher nicht weiter befassen, weil sich in einem gewissen nne alle mit Veränderungen im Raume verbundenen Vorgänge als Folgen eser allgemeinen Eigenschaft hinstellen lassen und ohnehin in den ver- hiedensten Gebieten der Physik von ihr die Rede sein wird.

Ähnlich verhält es sich mit anderen Eigenschaften der Körper. Während r Botaniker nur insoferne von den Theilen einer Pflanze spricht, als die- lbe Organismen besitzt, welche zu verschiedenen Lebensfunctionen noth- endig sind, ohne aber selbst eine eigene Pflanze zu bilden, werden wir in r Physik den Körpern keine derartige innere Einheit zuerkennen, die durch heilung aufgehoben werden könnte, wie es z. B. bei der Zerstörung eines aumes der Fall ist. Wir können daher nur vom physikalischen Stand- nkte aus die Behauptung aufstellen, dass die „Theilbarkeit" eine allgemeine igenschaft der Körper sei.

Es fällt uns ferner bei der Betrachtung eines Körpers sofort auf, in elche der drei verschiedenen Gruppen von Körpern er gehört, die wir als este, flüssige und luftförmige" Körper bezeichnen; durch die Angabe des ggregatzustandes wird das Verhalten der Körper derart charakterisiert, ıss wir bei der Beschreibung eines Körpers in der Regel zuerst angeben,

relcher von diesen drei Gruppen er angehört. Nach diesen drei Erscheinun
ormen der Körper wird auch der erste und wichtigste Abschnitt der Phy
lie Mechanik, in die Mechanik fester, flüssiger und luftförmiger Körper e
;etheilt. Wir werden daher auf die wesentlichen Merkmale der Aggreg
ustände in den einzelnen Abschnitten der Mechanik näher eingehen.

In allen Fällen ist eine sehr aufmerksame Beobachtung der Nat
rscheinungen selbst und aller sie begleitenden Umstände die unerlässli
/orbedingung für das klare Erfassen der dabei zur Geltung kommend
Vaturgesetze. Bei vielen Vorgängen vermögen wir durch unser eigenes E
;reifen die Erscheinungen so abzuändern, dass wir ihr Wesen leichter
:ennen, wir stellen also zur Erforschung der Naturgesetze „Versuche“ o
Experimente“ an.

Schließlich werden wir, wo es möglich und nützlich ist, die Beobachtu
n der Weise noch verschärfen, dass wir sie mit Zahlen, Gleichungen u
;eometrischen Größenziehungen verknüpfen und dadurch die Vorgänge
ler Natur mit Hilfe dieser bildlichen Formulierung unserem Vorstellungsv
nögen näher bringen.

Das metrische System.

Die Anzahl der verschiedenen Maß- und Gewichtseinheiten war v
Einführung des metrischen Systems eine so große, dass der Versuch bei d
Pariser Ausstellung im Jahre 1867 eine vollkommene Sammlung aller Ma
md Gewichtseinheiten anzulegen an der Unmöglichkeit scheiterte, dieselben
.em dafür bestimmten Gebäude unterzubringen. Schon zur Messung v
Längen gab es viele von Ort zu Ort wechselnde Einheiten, und diese stand
u den übrigen Maßen, wie z. B. zum Hohl- und Gewichtsmaß nicht in
infachen Beziehungen, wie es beim metrischen System der Fall ist.

Die Aufstellung des eben so sehr auf die größte Genauigkeit, wie au
uf Einheitlichkeit aller Messungen abzielenden metrischen Maßsystemes l
olgende Vorgeschichte. Im Jahre 1664 hatte der holländische Physil
Huygens den Vorschlag gemacht, die Länge des Secundenpendels als Ma
inheit zu wählen, da dieselbe überall gleich sei und daher auch überall a
hre Richtigkeit geprüft werden könne. Aber gerade der Umstand, um desse
rillen diese Einheit gewählt werden sollte, trifft nicht zu, da das Secunde
endel nicht in allen Breitegraden dieselbe Länge hat. Im Jahre 1670 spra
ich Gabriel Mouton dafür aus, dass man die Länge der Bogenminute ei
Meridians als Einheit wählen soll und, nachdem schon früher mehrere Gra
nessungen stattgefunden hatten, trat hauptsächlich auf Betreiben des berühmt
ranzösischen Physikers Laplace im Jahre 1790 eine neue Commission v
Gelehrten zusammen, unter denen sich auch Borda, Lagrange, Lavoisier u
Coulomb befanden, und empfahl den zehnmillionten Theil des Erdmeridia
uadranten als Längeneinheit einzuführen. Infolgedessen wurden zwei Expe
ionen ausgerüstet, von denen die eine in Lappland, also möglichst nahe de
Nordpol, die andere in Peru, also unter dem Äquator, Gradmessungen v
ehmen sollte. Jedoch nur letztere erzielte den gewünschten Erfolg, und d
araus sich ergebende Längeneinheit blieb für die Einführung des Meters ma
ebend. Das Gewicht eines c^3 reinen Wassers bildet bei 4° C die Gewichtseinhe
as Gramm. Erst am 20. Mai 1875 kam es zu einer von den meisten Cultu
taaten beschickten Conferenz, welche einen am 1. Jänner 1876 in Kraft getreten

ertrag schloss, demzufolge ein internationales, wissenschaftliches Institut it dem Sitze in Paris errichtet wurde, nämlich das „Bureau des poids et esures“, dessen Arbeiten im September 1889 mit der „Generalconferenz r Maß und Gewicht“ ihren Abschluss fanden. Es wurde von demselben e Herstellung von 30 Urmaßstäben und 40 Kilogrammgewichten veranlasst ıd überwacht, welche durch das Los an die einzelnen Staaten vertheilt ırden. Für alle Messungen bilden fortan nur mehr diese Urmaße (Prototype) n Ausgangspunkt. Sowohl die Maßstäbe wie auch die Gewichte bestehen ıs 9 Gewichtstheilen Platin und 1 Theil Iridium.

Um alle Messungen aus den verschiedenen Gebieten der Physik ımittelbar aufeinander beziehen zu können, legt man in der Physik allen ingenmessungen 1 cm, den Flächenmessungen 1 cm², der Raum- oder olummessung 1 cm³ und den Massenbestimmungen die Masse eines Gramm-wichtes zu Grunde. Dieses von allen praktischen Nebenzwecken unab-ingige und nur der Einheitlichkeit aller Messungen Rechnung tragende nheitssystem bezeichnet man als „absolutes Maßsystem“; die für stimmte Messungen geeigneteren dekadischen Einheiten höherer oder edrigerer Ordnung bezeichnet man als praktische Einheiten, weil sie m Bedürfnis der Praxis entsprechend zu kleineren oder größeren Maß-hlen führen, mit denen man bequemer rechnen kann.

Längeneinheiten.

osolute Einheit = 1 cm = 0·01 des Urmaßstabes von 1 m Länge.

aktische Einheiten:

1 Millimikron	= 1 μμ	= 0·000 001 mm	= 0·000 0001 cm	= 10^{-7}	cm.
1 Mikron	= 1 μ	= 0·001 mm	= 0·0001 cm	= 10^{-4}	cm.
1 Millimeter	= 1 mm	= 0·001 m	= 0·1 cm	= 10^{-1}	cm.
1 Meter	= 1 m	=	100 cm	= 10^{2}	cm.
1 Kilometer	= 1 km	= 1000 m	= 100 000 cm	= 10^{5}	cm.

Flächeneinheiten.

osolute Einheit = 1 cm²

aktische Einheiten:

1 Quadratmillimeter	= 1 mm²	= 0·01 cm²		= 10^{-2}	cm².
1 Quadratdecimeter	= 1 dm²	= 100 cm²		= 10^{2}	cm².
1 Quadratmeter	= 1 m²	= 10 000 cm²		= 10^{4}	cm².
1 Ar	= 1 a	= 100 m²	= 1 000 000 cm²	= 10^{6}	cm².
1 Hektar	= 1 ha	= 10 000 m²	= 100 000 000 cm²	= 10^{8}	cm².
1 Quadratkilometer	= 1 km²	= 1 000 000 m²	= 10 000 000 000 cm²	= 10^{10}	cm².

Volumseinheiten.

osolute Einheit = 1 cm³.

aktische Einheiten:

1 Cubikmillimeter	= 1 mm³	= 0·001 cm³	= 10^{-3}	cm³.
1 Liter	= 1 l	= 1000 cm³	= 10^{3}	cm³.
1 Hektoliter	= 1 hl	= 100 000 cm³	= 10^{5}	cm³.
1 Cubikmeter	= 1 m³	= 1 000 000 cm³	= 10^{6}	cm³.

Gewichtseinheiten.

osolute Einheit = 1 g = 0·001 des Prototypkilogrammgewichtes.

aktische Einheiten:

1 Mikrogramm	= 1 μ g	= 0·000 001 g	= 10^{-6}	g.
1 Milligramm	= 1 mg	= 0·001 g	= 10^{-3}	g.
1 Dekagramm (Deka)	= 1 dkg	= 10 g	= 10	g.
1 Kilogramm	= 1 kg	= 1000 g	= 10^{3}	g.
1 Metercentner	= 100 kg	= 100 000 g	= 10^{5}	g.
1 Tonne = 1 t	= 1000 kg	= 1 000 000 g	= 10^{6}	g.

Die Winkel- und Kreistheilung.

Während das eben auseinandergesetzte System von Raum- und M
einheiten als ein glänzender Erfolg des harmonischen Zusammenwirke
modernen Staaten in wissenschaftlichen Fragen betrachtet werden muss,
die Eintheilung des Winkels und Kreisbogens noch immer das Gepräg
bei den ältesten uns bekannten Culturvölkern üblichen Sexagesimalsy
in welchem jede Einheit niedrigeren Ranges 60 mal kleiner ist als die
höhere. Dabei gieng man allerdings nicht vom vollen, gestreckten oder r
Winkel aus, sondern von dem constructiv am leichtesten herzustel
Winkel im gleichseitigen und daher auch gleichwinkeligen Dreieck. I
theilte man in 60 Grade, jeden Grad in 60 Minuten und jede Mim
60 Secunden ein. Mit dem Winkelmaß verband man naturgemäß au
Messung des Kreisbogens. Erst viel später, als das Verhältnis des
durchmessers zum Umfang auf dem Wege der Rechnung mit einem beli
Grad von Genauigkeit festgestellt worden war, stellte sich auch wiede
neue Bogen- und damit auch eine neue Winkelbezeichnung ein. Das
hältnis der Länge des Umfanges zu der des Durchmessers, also die I
fische Zahl $\pi = 3{\cdot}14159\ldots$ gestattet die Länge des Umfanges a
Länge des Radius als Einheit zu beziehen. Man pflegt daher auch
vollen Winkel mit 2π, den gestreckten mit π und den rechten mit
bezeichnen. Da in diesem Falle der Winkel durch das Verhältnis z
Strecken ausgedrückt wird, so ist diese Maßzahl wie alle trigonometri
Functionen eine unbenannte Zahl, die sich bei Einführung einer neuen
einheit nicht ändert, wie es bei den Maßzahlen der Längen, Flächen, K
inhalte der Fall wäre. Wenn man endlich den Umfang des Kreises ode
vollen Winkel als Einheit auffasst und nach dem Decimalsystem ein
so kann man alle kleineren Winkel durch Decimalbrüche darstellen, und
erhält z. B. der rechte Winkel die Maßzahl 0·25. Dieses Winkelmaß
insbesondere verwendet, um bei einer rotierenden Bewegung die Umläufe
Touren zu zählen.

Die Zeiteinheit.

Befänden wir uns auf dem Nordpol und zwar in einer Stellung,
wir fortwährend unser Antlitz einem bestimmten Sternbilde z. B. den
Widders zuwenden, so würde sich die Erde unter unseren Füßen von r
nach links drehen, und die Zeit, welche vergeht, bis sie eine solche
drehung vollendet hat, ist das Urmaß der Zeitrechnung. Infolge d
Drehung der Erde scheinen sich die Sonne, der Mond und alle Sterne
Osten nach Westen zu bewegen. Da die tägliche Bewegung der Sterne
Himmel durch Winkelmessungen bestimmt wird, so ist das in der Wi
messung übliche Sexagesimalsystem auch auf die Zeitmessung übergegan
Die Zeit, welche während einer Umdrehung der Erde um ihre eigene A
oder von dem Augenblicke an vergeht, in welchem ein Stern die hö
Stelle über dem Horizonte einnimmt, bis er das nächstemal an diesen P
gelangt, bildet den „Sterntag“. Diesen Zeitraum theilt man in 24 Stun
die Stunde in 60 Minuten und die Minute in 60 Secunden ein und bezeic
die nach diesen Einheiten gemessene Zeit als „Sternzeit“. Während e
solchen Stunde beschreibt ein Stern am Himmel einen Bogen von 15 Bo
graden, also in einer Zeitminute einen Weg von 15 Bogenminuten un
einer Zeitsecunde einen Weg von 15 Bogensecunden.

Würde sich die Erde nicht zugleich um die Sonne bewegen, so müsste die der Sonnenbewegung entnommene Zeitrechnung mit der „Sternzeit“ übereinstimmen. Wie uns aber, wenn wir in einem Eilzuge fahren, die näher liegenden Gegenstände schneller zurückzuweichen scheinen als die entfernteren, so bleibt scheinbar auch die Sonne im Vergleiche zu den entfernteren Sternen in ihrer scheinbaren Bewegung zurück. Sie bleibt den Sternen gegenüber durchschnittlich jeden Tag etwa um 4 Zeitminuten, also nahezu um einen Bogengrad zurück, und die Zeit, bis sie um volle 360 Grade zurückgeblieben ist, nennen wir ein siderisches Jahr. Unterdessen hat aber jeder Stern seine Kreisbahn 366·2422mal, die Sonne aber nur 365·2422mal zurückgelegt. Wäre die Zeit, um welche die Sonne täglich den Sternen gegenüber zurückbleibt, immer dieselbe, also auch die Zeit von einer höchsten Stellung der Sonne bis zur nächsten immer gleich, so könnten wir die Sonnenbewegung noch immer zur Zeitmessung benützen. Dies ist aber nicht der Fall, weil sich die Erde nicht immer mit derselben Geschwindigkeit um die Sonne bewegt. Wollen wir trotzdem die Sonnenbewegung wegen ihres Einflusses auf das bürgerliche Leben einer Zeitrechnung zu Grunde legen, so müssen wir den der wirklichen Sonnenbewegung entsprechenden „wahren Sonnentag“ durch den „mittleren Sonnentag“ ersetzen, der sich einstellen würde, wenn die Sonne täglich um dieselbe Zeit, nämlich um 3 Minuten und 56 Secunden zurückbleiben würde. Theilen wir diesen „mittleren Sonnentag“ wieder in 24 Stunden zu je 60 Minuten u. s. w., also im Ganzen in 86400 Secunden ein, so erhalten wir jenen Zeitraum, der in der Physik als absolute Zeiteinheit verwendet wird. Wenn wir das Pendel einer Uhr so regulieren, dass es an einem „mittleren Sonnentage“ genau 86400 Schwingungen macht, so weicht jede solche Schwingung dieses Pendels von einer Secunde auch nicht um $^{1}/_{86400}$ ab; eine solche Uhr gibt also die absoluten Zeiteinheiten mit außerordentlicher Genauigkeit an.

Dimensionsformeln.

Wenn wir die physikalischen Erscheinungen nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ verfolgen, so sind wir oft gezwungen, mit verschieden benannten Größen zu operieren. In diesem Falle muss man bei der Addition stets darauf achten, dass alle Summanden gleichbenannt sind; wenn benannte Größen miteinander multipliciert werden, so nimmt das Product eine neue Benennung an, deren Einheit erst definiert werden muss.

Zur Charakterisierung derartiger benannter Größen bedient man sich der Dimensionsformeln, die uns nicht nur über den gegenseitigen Zusammenhang der verschiedenen Factoren unterrichten, sondern auch zu ermitteln gestatten, wie die Maßzahl einer Größe sich ändert, wenn man der Messung neue Einheiten zu Grunde legt.

Zur Darstellung aller in der Physik vorkommenden Größen reichen die drei Einheiten der Länge, der Masse und der Zeit hin, weshalb man dieselben als die „Fundamentaleinheiten“, die anderen dagegen als die daraus „abgeleiteten Einheiten“ bezeichnet. So wird z. B. Flächeninhalt eines Quadrates dadurch berechnet, dass man eine Seitenlänge mit der anderen multipliciert. Wie wir aus dem eben angeführten Grunde für das Product zweier gleicher Factoren auch in der Arithmetik den Ausdruck „Quadrat“ gebrauchen, ohne deshalb dasselbe als eine Fläche hinstellen zu wollen, so charakterisieren wir umgekehrt die Fläche als solche durch das Product zweier Längen, ohne damit behaupten zu wollen, dass sie wirklich das Product zweier Längen sei. Um aber anzudeuten, dass wir nicht die Maßzahl einer Länge, sondern nur die Benennung dieser Größenart betonen, sagen wir, die „Länge“ habe die Dimension $[l]$ und die Dimension einer Fläche sei $[l^2]$ und die eines Körpers oder eines Volumens $[l^3]$; $[m]$ bedeutet eine Masse, aber nicht deren Maßzahl, und $[t]$ kennzeichnet die Zeit als solche, aber nicht deren Dauer.

Die Dimensionsformeln charakterisieren nicht nur die Größenart oder deren Benennung, sondern sie geben uns auch die Verwandlungszahl der Maßzahlen zwischen

zwei Größen derselben Dimension an, wenn wir das Verhältnis der Einheiten kennen. Das ist bei Umrechnungen von großer Wichtigkeit, weil wir bei den Anwendungen oft von den in der Physik üblichen „absoluten Grundeinheiten" auf die „praktischen Einheiten" übergehen müssen. So werden wir z. B. sagen, der Querschnitt eines Drahtes habe als Fläche die Dimension $[l^2]$; beträgt die Maßzahl in mm² ausgedrückt 3 Einheiten, so geht dieselbe bei der Verwandlung in cm² über in 0·03 cm², weil 1 mm = 0·1 cm, und $(0{\cdot}1)^2 = 0{\cdot}01$.

Die Tourenzahl einer rotierenden Maschine wird gewöhnlich durch die Zahl der „Umdrehungen in einer Minute" = n angegeben; $\frac{1}{n}$ bedeutet die Dauer einer einzigen Umdrehung und hat daher die Dimension $[t]$; n hat daher die Dimension $\left[\frac{1}{t}\right] = [t^{-1}]$. Die auf Secunden bezogene Tourenzahl n' ist mithin gleich $\frac{n}{60}$. Die Untersuchung der Dimension einer physikalischen Größe ist schließlich in vielen Fällen auch eine wertvolle Controle für die Richtigkeit ihrer Ableitung aus anderen physikalischen Begriffen.

Das Messen.

Da die meisten Messungen auf Längenmessungen zurückgeführt werden, so ist die genaue Messung von Strecken sehr wichtig.

Längenmessung. Die Maßstäbe sind entweder Strichmaße oder Endmaße. Bei ersteren wird die Länge nach der Entfernung zweier paralleler Striche bemessen, wie es bei den Prototypmaßstäben der Fall ist, bei den Endmaßen dagegen nach der Entfernung der parallelen Endflächen des Maßstabes. Bei der Schublehre (Fig. 1) legt man die zu messende Länge zwischen die parallelen Ebenen des Maßstabes. Bruchtheile der kleinsten Unterabtheilungen kann man noch mit Hilfe des „Nonius" (Fig. 2) genauer bestimmen.

Fig. 1.

Fig. 2.

Will man noch Zehntel der kleinsten, auf dem Hauptmaßstabe aufgetragenen Einheiten ablesen, so theilt man 9 solche Einheiten zusammengenommen in 10 gleiche Theile, deren jeder mithin um 0·1 kleiner ausfällt als die Einheiten auf dem Hauptmaßstabe. Wird dieser zweite Maßstab neben dem Hauptmaßstabe so lange verschoben, bis sein O-Strich die zu messende Strecke begrenzt, so kann man am Hauptmaßstabe zuerst die ganzen Theilstriche, z. B. 312, und am Nonius noch die Zehntel ablesen, indem man sieht, der wievielte Strich des Nonius mit einem Theilstriche des Hauptmaßstabes übereinstimmt. Ebenso viele Zehntel liegt der O-Strich des Nonius rechts von 312, also lesen wir in der Figur 312·7 ab.

Sehr kleine Längenunterschiede misst man mit der Mikrometerschraube (Fig. 3). Wenn man bei derselben die Trommel um 360° dreht, so nähern sich die Flächen, deren Distanz gemessen wird, um die Höhe eines Schraubenganges, also z. B. um 1 mm. Bei einer Drehung um 0·01 der Peripherie erhält man eine Verschiebung von 0·01 mm. So kann man aus der Zahl der Umdrehungen und den Bruchtheilen derselben die Entfernung der Endflächen leicht bis auf 0·01 mm genau ablesen.

Fig. 3.

Flächenmessung. Nur wenige Flächen lassen sich durch Längenmessungen auf einfachem Wege berechnen. In allen anderen Fällen verwendet man sogenannte „Planimeter“. Manche Planimeter werden aus durchsichtigen Platten hergestellt, welche in entsprechend kleine Quadrate getheilt sind; legt man dieselben auf die zu messende Fläche, so kann man deren Inhalt durch Abzählung der auf sie entfallenden Quadrate finden. Andere Planimeter sind so eingerichtet, dass man mit einem Stifte nur den Umfang der Fläche zu beschreiben braucht und dann an einem Zeiger die Maßzahl der eingeschlossenen Flächeneinheiten ablesen kann.

Messung des Körperinhaltes. Noch seltener als bei Flächenbestimmungen führt bei Körpern die geometrische Berechnung zum Ziele. Die einfachste Bestimmungsmethode ist die, dass man den Körper in ein „calibriertes“ Gefäß gibt, das zugleich eine Flüssigkeit enthält, in der sich der Körper nicht löst. Wenn man beobachtet, um wie viel cm^3 die Flüssigkeit dabei steigt, so kennt man auch das Volumen des Körpers. Hat ein Körper durchwegs dieselbe Dichte, so kann man das Volumen auch aus dem Gewichte berechnen, wenn man das Gewicht der Volumeinheit kennt. Ebenso kann man mit Hilfe von calibrierten Gefäßen oder auch durch Gewichtsbestimmung das Volumen von Flüssigkeiten finden. Das Volumen kleiner Gefäße bestimmt man, indem man sie mit Quecksilber füllt und dessen Volumen durch Wägung feststellt.

Die Massenbestimmung geschieht am einfachsten mit Hilfe der Wage. Als Vergleichsmaß pflegt man „Gewichtssätze“ zu verwenden. Dabei trifft man meistens folgende Combinationen, um alle Bruchtheile eines Kilogrammes oder Grammes herzustellen:

1 kg	50 dkg	20 dkg	10 dkg	10 dkg	
	5 „	2 „	1 „	1 „	
	5 g	2 g	1 g	1 g	1 g

1 g	0·5 g	0·2 g	0·1 g	0·1 g	
	0·05 „	0·02 „	0·01 „	0·01 „	
	0·005 „	0·002 „	0·001 „	0·001 „	0·001 g

In vielen Fällen ist man auf Messungen durch „Aichung“ angewiesen. Wenn man an einer Spiralfeder 2 dkg aufhängt, so dehnt sie sich aus, aber nicht doppelt so viel, als wenn man nur 1 dkg zur Dehnung benützt. Trotzdem kann man die Dehnung einer Spiralfeder zur Gewichtsbestimmung benützen, indem man an einer Scala die Stellen bezeichnet, bis zu welcher sich die Spiralfeder bei jedem Gewichte ausdehnt. Bei der Federwage (Fig. 4) wird das Gewicht durch die Verkürzung einer Spiralfeder gemessen.

Jede Messung führt nothwendiger Weise zu unvollständigen Zahlen, d. h. wir können nie wissen, ob bei einer noch genaueren Messung nicht noch Stellen niedrigeren Ranges in Betracht gezogen werden müssten. Wenn also mehrere Maßzahlen in dieselbe Multiplication einbezogen werden, so hat es keinen Zweck, im Resultate eine größere relative Genauigkeit anzustreben, als irgend ein Factor des zu bildenden Productes sie besitzt. Bei der Bildung von Summen ist die absolute Genauigkeit des ungenauesten Summanden für die absolute Genauigkeit der Summe maßgebend.

Fig. 4.

Mechanik.

Mechanik fester Körper.

Die gleichförmige Bewegung.

Die einfachste Bewegungsform, die wir vorfinden, ist die, wenn ein Körper auf geradliniger Bahn in gleichen Zeiten gleiche Strecken zurücklegt. So selten es auch vorkommen mag, dass uns dieselbe in ihrer reinsten Form begegnet, so oft können wir sie in der Natur und im praktischen Leben wenigstens angenähert beobachten. Der normale Gang des Menschen und der Thiere, die Bewegung der meisten Fahrzeuge zu Wasser und zu Land, die scheinbare Bewegung von Sonne, Mond und Sternen, sowie auch das Fließen des Wassers und die Geschwindigkeit des Windes sind uns derart geläufige Erscheinungen, dass wir sie oft sogar zur Charakterisierung einer bestimmten Schnelligkeit benützen; wir sprechen in diesem Sinne von der Langsamkeit der Schnecke und von der Geschwindigkeit des Windes.

Sind die in gleichen Zeiten zurückgelegten Wegstrecken einander gleich, so ist der Quotient der Maßzahlen von Weg und Zeit constant. Wir bezeichnen eine solche Bewegung als gleichförmig und sagen: „Geschwindigkeit der gleichförmigen Bewegung ist der Quotient aus dem zurückgelegten Wege und der unterdessen verflossenen Zeit."

Die Dimension der Geschwindigkeit ist also $\frac{\text{Länge}}{\text{Zeit}}$ oder $[l\, t^{-1}]$.

Als absolute Geschwindigkeitseinheit stellen wir diejenige hin, bei der ein Punkt in der Secunde einen Weg von 1 cm zurücklegt, und wir bezeichnen dieselbe mit 1 (cm $\sec^{-1}$).

Die Geschwindigkeit der Schnecke entspricht ungefähr dem siebenten Theil derselben, und annähernd dürfte der normale Gang kleinerer Insekten der Geschwindigkeitseinheit entsprechen.

Da viele Geschwindigkeiten bedeutend größere Werte haben, so werden die Angaben oft auf „1 m pro Sec.", ja sogar auf „km pro Sec." bezogen. Unter den folgenden Beispielen befinden sich auch solche, deren Maßzahlen ziemlich verschieden sind; in solchen Fällen spricht man nur von Mittelwerten oder von beobachteten „Maximalwerten":

Der normale menschl. Gang	1·25	(m $\sec^{-1}$)
Stromgeschwindigkeit (Maximum)	4	„ „
Dampfschiff „	10	„ „
Fahrrad „	15	„ „
Orkan „	50	„ „
Schall in der Luft	332	„ „
Punkt auf dem Äquator	463	„ „
Kanonenkugel	600	„ „
Der Mond um die Erde	1	(km $\sec^{-1}$)
Äquatorialpunkt der Sonne	2	„ „
Erde um die Sonne	29·7	„ „
Licht und Elektricität	3.10^{10}	(cm $\sec^{-1}$)

Bezeichnen wir die Geschwindigkeit mit c, den zurückgelegten Weg mit s und die Zeit mit t, so bestehen zwischen diesen Größen folgende Gleichungen:

$$c = \frac{s}{t} \qquad s = ct \qquad t = \frac{s}{c}.$$

Sind zwei dieser Größen bekannt, so kann man die dritte mit Hilfe dieser Gleichungen oder auf constructivem Wege ermitteln. Für die letztere Methode eignet sich besonders die zweite Formel, denn wenn wir ein Rechteck construieren, dessen Länge der Maßzahl der Zeit und dessen Breite der Geschwindigkeit entspricht, so ist dessen Flächeninhalt ein Maß für den zurückgelegten Weg (Fig. 5).

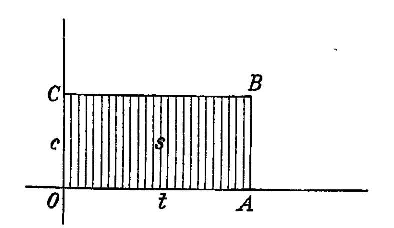


Fig. 5.

Um die Geschwindigkeit zu ermitteln, mit der z. B. das Wasser durch einen Canal fließt, misst man eine größere Strecke längs des Canals in m ab und zählt an der Uhr die Secunden, welche ein ins Wasser geworfenes Stück Papier braucht, um diese Strecke zurückzulegen.

Die zweite Formel kann man benützen, um mit Hilfe der Schallgeschwindigkeit $c = 332$ (m sec^{-1}) die Entfernung eines Ortes zu ermitteln. Man multipliciert zu diesem Zwecke den Wert von c mit der Anzahl der Secunden, welche vom Augenblick der sichtbaren Explosion bis zur Ankunft des Schalles vergehen.

Die dritte Formel benützt man, um z. B. die Zeit zu berechnen, die man bei normaler Marschgeschwindigkeit braucht, um nach einem Orte zu gelangen, dessen Entfernung in km angegeben ist.

Aus diesen Formeln ergibt sich ferner, dass z. B. die Maßzahl der Geschwindigkeit 100 mal kleiner wird, wenn wir eine 100 mal größere Längeneinheit wählen. Wenn wir dagegen eine 60 mal größere Zeiteinheit, also die Minute statt der Secunde verwenden, wird die Maßzahl der Zeit 60 mal kleiner, aber die der Geschwindigkeit dennoch wieder 60 mal größer, weil der Ausdruck für die Zeit im Divisor auftritt.

Unsere Auffassung jeder derartigen Bewegung ist aber unvollständig, wenn wir nicht zugleich ihre Orientierung im Raume und den Bewegungssinn ins Auge fassen. Um uns in diesem Sinne von der geradlinigen Bewegung mit constanter Geschwindigkeit, also von der gleichförmigen Bewegung ein zutreffendes Bild zu verschaffen, construieren wir eine Strecke, deren Länge gleich ist der Maßzahl der Geschwindigkeit, deren Richtung mit dem zurückgelegten Wege zusammenfällt oder zu ihm parallel ist, und versehen dieselbe mit einem Pfeile, welcher den Sinn der Bewegung angibt. Eine so construierte Strecke bezeichnet man als den „Vector" der Geschwindigkeit jener gleichförmigen Bewegung.

Die gleichförmige Beschleunigung.

Während wir uns bei manchen Bewegungen, z. B. bei der Erdbewegung kaum vorstellen können, dass sie auch einmal aufhören soll, sehen wir in vielen anderen Fällen Ruhe und Bewegung wechseln, und wir können oft den Augenblick angeben, in welchem die Bewegung begonnen hat.

Nehmen wir an, dass beim Übergange von der Ruhe zur Bewegung die Geschwindigkeit bis zu einem bestimmten Betrage c proportional mit der Zeit angestiegen sei, dass also zur Zeit $\frac{t}{2}$ die Geschwindigkeit gleich $\frac{c}{2}$ und zur Zeit $\frac{t}{n}$ gleich $\frac{c}{n}$ war, so besteht die Proportion

$$c : c_1 = t : t_1;$$

aus derselben folgt $\quad c : t = c_1 : t_1 = \text{const.}$

d. h. dieser Quotient behält immer denselben, also einen constanten Wert bei.

Aus der ersteren Proportion folgt $\quad (c - c_1) : c = (t - t_1) : t$

und daher auch die Proportion

$$(c - c_1) : (t - t_1) = c : t = \text{const., d. h.}$$

es bleibt der Quotient aus der Geschwindigkeitszunahme und der Zeit, während welcher dieselbe erfolgt ist, constant. Darauf stützt sich die Definition:

Unter Beschleunigung versteht man den Quotient aus der Geschwindigkeitsänderung und der Zeit, während welcher dieselbe erfolgt ist.

Diese Beschleunigung kann, wie die Differenz der Geschwindigkeiten, auch negativ sein, wenn nämlich die Geschwindigkeit mit der Zeit abnimmt. Im letzteren Falle spricht man auch von „Verzögerung".

Aus dieser Definition ergibt sich ferner als Dimension für die Beschleunigung der Ausdruck

$$[l t^{-1}] : [t] = [l t^{-2}]$$

und als absolute Einheit für die Beschleunigung 1 (cm sec^{-2}), also jene Beschleunigung, bei der die Geschwindigkeit in einer Secunde um 1 (cm sec^{-1}) zu- oder abnimmt.

Ist die Beschleunigung einer Bewegung, die wir mit a bezeichnen wollen, dauernd dieselbe, so sagen wir, die Bewegung sei eine gleichförmig beschleunigte; in jedem anderen Falle spricht man von einer ungleichförmig beschleunigten Bewegung. Da die Geschwindigkeit bei dieser Bewegungsform mit der Zeit zu- oder abnimmt, und daher deren Maßzahl sich fortwährend ändert, so wollen wir den veränderlichen Wert derselben im Gegensatze zum constanten c mit v bezeichnen. Unter der Geschwindigkeit in einem bestimmten Augenblick verstehen wir diejenige Geschwindigkeit, die der Punkt annehmen würde, wenn er von diesem Zeitpunkte an seine Bewegung ohne Beschleunigung fortsetzen könnte.

Ist die Geschwindigkeit proportional zur Zeit t vom Betrage Null bis zum Betrage v angestiegen, so bestehen die Gleichungen:

$$a = \frac{v}{t} \qquad v = at \qquad t = \frac{v}{a}.$$

Mit Hilfe der ersten dieser Gleichungen können wir die Beschleunigung finden, wenn wir die Endgeschwindigkeit und die Zeit kennen, innerhalb welcher dieselbe erreicht worden ist. Die zweite benützt man, um die Endgeschwindigkeit zu berechnen, falls man nebst der Zeit die Beschleunigung kennt; die dritte Gleichung besagt, in welcher Zeit ein Körper bei einer gewissen Beschleunigung die Endgeschwindigkeit v erreicht.

Um aus der Geschwindigkeit und aus der Zeit die Länge des zurückgelegten Weges zu berechnen, haben wir bei der gleichförmigen Bewegung die Formel $s = ct$ verwendet. Die Berechnung derselben fällt also mit der Bestimmung des Flächeninhaltes s (Fig. 5) eines Rechteckes $OABC$ zusammen, dessen Grundlinie der Maßzahl der Zeit t und dessen Höhe der Geschwindigkeitszahl c entspricht. Wenn die Geschwindigkeit nicht wie in diesem Falle constant, sondern veränderlich ist und zwar proportional mit der Zeit vom Werte Null bis zum Werte v ansteigt, so dürfen wir bei der Berechnung des zurückgelegten Weges nicht das Rechteck mit seiner durchwegs gleichen Höhe verwenden, sondern wir gehen bei der graphischen Bestimmung dieser Größe vom Flächeninhalte eines Dreieckes OAB (Fig. 6) aus, dessen Grundlinie der abgelaufenen Zeit t und dessen Höhe der nach Ablauf dieser Zeit erreichten Geschwindigkeit

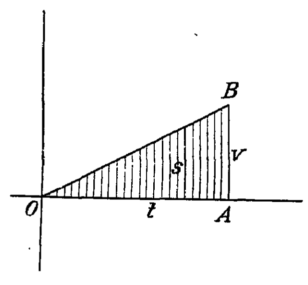


Fig. 6.

$a \cdot t = v$ gleichkommt; dieser Flächeninhalt, und daher auch die Maßzahl der in dieser Zeit zurückgelegten Wegstrecke, ist also gleich

$$s = \frac{1}{2} \cdot t \cdot at = \frac{1}{2} at^2.$$

Mit dieser Formel lässt sich wieder jede der in ihr vorkommenden Größen berechnen, wenn die beiden anderen bekannt sind. Es ist also:

$$s = \frac{a\,t^2}{2} \qquad a = \frac{2\,s}{t^2} \qquad t = \sqrt{\frac{2\,s}{a}}.$$

Betrachten wir die in den einzelnen Secunden zurückgelegten Wege, so finden wir, dass der Weg, welchen ein Punkt bei gleichförmig beschleunigter Bewegung in der t. ten Secunde zurücklegt, offenbar gleich ist

$$\frac{1}{2}\,a t^2 - \frac{1}{2}\,a\,(t-1)^2 = \frac{1}{2}\,a\,(t^2 - t^2 + 2\,t - 1) = \frac{1}{2}\,a\,(2\,t - 1).$$

Bedeutet also t eine ganze Anzahl von Secunden, so stellt $2t$ eine gerade, und $2t-1$ eine ungerade Anzahl dar, mithin wachsen die in den einzelnen Secunden zurückgelegten Wege wie die ungeraden Zahlen.

Um die Endgeschwindigkeit zu berechnen, gehen wir von der Formel $v = at$ aus und setzen in derselben $t = \sqrt{\frac{2\,s}{a}}$; so erhalten wir drei neue Gleichungen:

$$v = a\sqrt{\frac{2\,s}{a}} = \sqrt{2\,a\,s} \qquad a = \frac{v^2}{2\,s} \qquad s = \frac{v^2}{2\,a}.$$

Mit Hilfe der Atwood'schen Fallmaschine und mit der Galilei'schen Fallrinne lassen sich sowohl gleichförmige, wie auch gleichförmig beschleunigte Bewegungen herstellen, die so langsam verlaufen, dass wir deren Verlauf mit dem Auge leicht verfolgen können. So lange bei der Fallmaschine die eine Schnur mehr belastet ist als die andere, erhalten wir eine gleichförmig beschleunigte Bewegung und, nachdem das Übergewicht abgehoben wurde, eine gleichförmige; wir müssen also im ersten Zeitabschnitte die Formeln der gleichförmig beschleunigten, und im zweiten Theile die der gleichförmigen Bewegung verwenden. Die zurückgelegten Wegstrecken können wir am Maßstabe ablesen und die abgelaufenen Secunden an den Pendelschlägen nachzählen. Die Geschwindigkeit und die Beschleunigung werden durch Rechnung ermittelt. Bei der Fallrinne entfällt auf den schiefen Theil die gleichförmig beschleunigte und auf die horizontale Fortsetzung die gleichförmige Bewegung.

Hört z. B. die gleichförmig beschleunigte Bewegung am Ende der 3. Secunde auf, nachdem der bewegliche Körper einen Weg von 45 cm zurückgelegt hat, so ist die Beschleunigung $a = 2\,s : t^2 = 2 \cdot 45 : 9 = 10$. Lassen wir dann die Bewegung in eine gleichförmige übergehen, so ergibt sich für die Endgeschwindigkeit nach der 3. Secunde $v = at = 10 \cdot 3 = 30$, also kommt der Körper am Ende der 4. Secunde zum Theilstrich $45 + 30 = 75$ und am Ende der 5. Secunde bis zum Theilstrich $75 + 30 = 105$ u. s. w.

Der Begriff Beschleunigung wurde zuerst von Galilei (1602) entwickelt.

Wir haben die gleichförmige und die gleichförmig beschleunigte Bewegung hinsichtlich ihrer Beziehung zu Weg und Zeit kennen gelernt, aber wir wissen noch nicht, unter welchen Umständen die eine oder die andere zustande kommt. Diese Beziehung zwischen beiden Bewegungsformen vermitteln uns zwei neue Begriffe der Mechanik, die zueinander in so enger Beziehung stehen, dass man den einen kaum nennen kann, ohne an den anderen zu denken, es sind dies die Begriffe von „Kraft“ und „Masse“.

Kraft und Masse.

Das Wort „Kraft“ hat in der Physik zu vielen Missverständnissen Anlass gegeben, da es auch in anderen Wissensgebieten und in der Umgangssprache in einem viel weiteren Sinne gebraucht wird. Immer aber verbindet man damit den Gedanken an die Überwindung eines Widerstandes und die dadurch hervorgerufene Veränderung. Die Erfahrung lehrt, dass alle Körper dem Bestreben, sie in Bewegung zu versetzen oder ihren Bewegungszustand zu ändern, einen gewissen Widerstand entgegensetzen. Jede Überwindung eines derartigen Widerstandes schreiben wir einer „Kraft“ im Sinne der Mechanik zu.

Wir fühlen einen Stoß, wenn wir mit einem auch vollkommen frei beweglichen Körper größeren Umfanges zusammentreffen oder gezwungen sind, der Bewegung desselben plötzlich Einhalt zu thun. Der Rückschlag, den ein Gewehr erfährt, weil die Kugel im Laufe sich der Annahme einer so großen Geschwindigkeit widersetzt, die Durchschlagskraft des Geschosses, sobald es in seiner Bewegung plötzlich innegehalten wird, und viele andere ähnliche Erscheinungen bestätigen diese Auffassung.

Diese Erscheinung beschreibt Newton mit den Worten: „Jeder Körper verharrt in seinem Zustande der Ruhe oder der geradlinigen, gleichförmigen Bewegung, bis er durch eine äußere Kraft zur Veränderung dieses Zustandes veranlasst wird."

Man bezeichnet diesen Satz als das erste Newton'sche Gesetz, und den Widerstand, den alle Körper der Änderung ihres Bewegungszustandes entgegensetzen, als die ihnen allen gemeinsame Eigenschaft der kinetischen „Trägheit".

In einem zweiten Gesetz spricht Newton die Ansicht aus, dass die „Richtung der Kraft" mit der Richtung der Bewegung übereinstimmen müsse, und dass auch zwischen Kraft und Masse eine proportionale Beziehung bestehe. Die letztere Bemerkung bezieht sich bereits auf den Einfluss der „Masse", den wir alsbald kennen lernen.

Das dritte Newton'sche Gesetz besagt endlich, dass die Wirkungen, die zwei Körper aufeinander ausüben, der Maßzahl nach gleich, dem Sinne nach entgegengesetzt gerichtet sind, was man auch mit den Worten ausdrückt, „Wirkung gleich Gegenwirkung". Wir werden dieses Gesetz zur Messung der „Kräfte" verwenden.

Wenn ein früher ruhender Körper zu Boden fällt, so muss seine kinetische Trägheit durch eine Kraft überwunden worden sein, deren Richtung vertical und deren Sinn nach unten gerichtet ist.

Die Maßzahl der durch diese Kraft erzeugten Beschleunigung werden wir später durch die Beobachtung der Schwingungsdauer eines Pendels ermitteln und finden, dass dieselbe 981 (cm sec^{-2}) beträgt. Diese von der Erde ausgehende Kraft bezeichnet man als Schwerkraft, und die Größe derselben für einen bestimmten Körper als dessen Gewicht.

In der Natur treten noch viele andere Kräfte auf. Wir sind im Stande, durch unsere Körperkraft den Bogen zu spannen, und wenn derselbe beim Losschnellen wieder seine frühere Gestalt annimmt, so muss er dabei die kinetische Trägheit des Pfeiles durch seine Elasticität überwinden, um ihm die zum Fluge nöthige Geschwindigkeit zu ertheilen. In ähnlicher Weise vermögen die Elektricität und der Magnetismus Körper in Bewegung zu versetzen oder sie aufzuhalten, also auf dieselben Kräfte auszuüben.

Benützen wir das Gewicht eines Körpers, um die Spiralfeder einer Federwage auseinanderzuziehen, so müssen wir nach dem dritten Newton'schen Gesetze annehmen, dass die Kraft der Feder und die des Gewichtes einander gleich sind. Ein anderes Mittel, um zwei Kräfte als Wirkung und Gegenwirkung miteinander zu vergleichen, besteht darin, dass wir zwei Gewichte durch eine Schnur miteinander verbinden und dieselbe über eine sehr leicht drehbare Rolle laufen lassen, dass die beiden Gewichte die Rolle im entgegengesetzten Sinne zu drehen suchen. Bleibt die Rolle in Ruhe, so sind die beiden Gewichte gleich; tritt dagegen Bewegung ein, so muss der Überschuss des größeren Gewichtes beiden Gewichten die hiezu nöthige Beschleunigung ertheilen.

Nachdem wir so in der Lage sind, die Gleichheit mehrerer Kräfte nachzuweisen, können wir eine Reihe von Körpern herstellen, deren Gewichte einander gleich sind, und wenn wir eine Federwage mit 1, 2, 3 . . . solcher Gewichte belasten und die entsprechenden Zeigerstellungen auf der Scala notieren, so haben wir damit die Federwage für diese vorläufigen Krafteinheiten „geaicht" und können mit Hilfe derselben Kräfte messen.

Befestigen wir an einer Schnur, die über eine sehr leicht bewegliche Rolle läuft, beiderseits je $1/2$ kg, so werden diese beiden Gewichte keine Drehung hervorrufen. Wenn wir aber auf der einen Seite statt 500 g nur 495, auf der anderen Seite

dagegen 505 g befestigen, so werden sich die beiden Gewichte, das eine nach oben, das andere nach unten bewegen, und sie würden in der ersten Secunde einen Weg von 4·9 cm zurücklegen, wenn nicht zugleich auch die Rolle und die Schnur in Bewegung gerathen und Reibung verursachen würden.

In diesem Falle hat ein Übergewicht von $505 - 495 = 10$ g die $505 + 495 = 1000$ g in Bewegung versetzt und ihnen nach der Formel $s = \frac{1}{2} a \,.\, 1^2 = 4 \cdot 9$ eine Beschleunigung $a = 2 \,.\, 4 \cdot 9 = 9 \cdot 8$ (cm sec^{-2}) ertheilt.

Verwenden wir 510 und 490 g, so müssen wie früher 1000 g in Bewegung versetzt werden, aber jetzt werden als Triebkraft $510 - 490 = 20$ g benützt; dadurch steigt die Beschleunigung, abgesehen von den früher erwähnten Hindernissen, auf das Doppelte, nämlich auf $2 \,.\, 9 \cdot 8 = 19 \cdot 8$ (cm sec^{-2}). Wenn wir 515 und 485 g verwenden, so bewirkt das Übergewicht von $515 - 485 = 30$ g eine dreimal größere Beschleunigung und ein n mal größeres Übergewicht eine n mal größere Beschleunigung.

Daraus ziehen wir den Schluss, dass eine n mal größere Kraft derselben Masse eine n mal größere Beschleunigung ertheilt, dass mithin die Kraft der Beschleunigung proportional ist.

Wenn wir das Übergewicht 2, 3 . m mal kleiner machen und auch die in Bewegung zu versetzenden Gewichtsstücke ebenso oftmal kleiner wählen, so bleibt die Beschleunigung dieselbe wie früher. Befestigen wir an der Schnur auf der einen Seite 247·5 und auf der anderen Seite 252·5 g, so ertheilt ein Übergewicht von $252 \cdot 5 - 247 \cdot 5 = 5$ g einer Anzahl von $252 \cdot 5 + 247 \cdot 5 = 500$ g wieder eine Beschleunigung von 4·9 (cm sec^{-2}), also ist nur die halbe Kraft nöthig, um der halben Anzahl von Grammen dieselbe Beschleunigung zu ertheilen.

Benützen wir endlich ein Übergewicht von 20 g, um 2000 g fortzubewegen, indem wir auf der einen Seite 1010 und auf der anderen Seite 990 g befestigen, so erhalten wir abermals dieselbe Beschleunigung, wie bei 10 g Übergewicht und 1000 g Last. Daraus folgt, dass eine m fach größere Menge von Grammstücken der bewegenden Kraft einen m fach größeren Widerstand entgegensetzt oder ein m fach größeres Beharrungsvermögen besitzt.

Insoferne die Anzahl der Gramme eine Maßzahl für den Widerstand bildet, welchen dieselben der Beschleunigung entgegensetzen, bezeichnet man sie als „Masse“.

Der Einfluss, den die „Masse“ eines Körpers vermöge der kinetischen Trägheit der Beschleunigung entgegensetzt, lässt sich sehr anschaulich durch folgenden Versuch zeigen. Zwei hölzerne Walzen von gleichem Querschnitt, aber verschiedener Achsenlänge sind durch eine Spiralfeder in der Weise miteinander verbunden, dass die Federkraft die parallel liegenden Achsen einander zu nähern sucht. (Fig. 7.) Würde ein und dieselbe Kraft, nämlich die der Feder, verschiedenen Körpermassen dieselbe Beschleunigung ertheilen, so müssten sich auch die beiden Walzen, nachdem die Feder durch die Entfernung der Walzen gespannt wurde, vollkommen symmetrisch einander nähern. Der Versuch zeigt aber, dass die Walze mit der größeren Masse zurückbleibt.

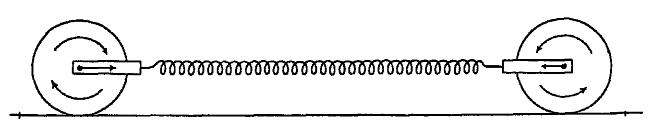


Fig. 7.

Da wir als Raumeinheit in der Physik 1 cm^3 eingeführt haben, so werden wir die Masse eines cm^3 Wasser bei 4^0 C als Masseneinheit verwenden. Ihre Dimension bezeichnen wir mit $[m]$.

Wenn irgend eine Kraft, sei es die Schwerkraft, die Elasticität eines Körpers, die Elektricität oder der Magnetismus, die kinetische Trägheit einer Gramm-Masse überwindet und ihr eine Beschleunigung von 1 (cm sec^{-2}) ertheilt, so betrachten wir eine solche Kraft als „Einheit der Kraft“ und bezeichnen dieselbe als „ein Dyn“.

Ertheilt also
eine Kraft der Masse $1\,g$ die Beschleunigung 1 (cm sec^{-2}), so ist sie gleich 1 Dyn
„ „ „ „ mg „ „ 1 (cm sec^{-2}) „ „ „ „ m Dyn
„ „ „ „ mg „ „ n (cm sec^{-2}) „ „ „ „ mn Dyn

Daraus folgt: Die Maßzahl der Kraft ist gleich dem Producte aus der Maßzahl der Masse und der Maßzahl der Beschleunigung, und zwar erhalten wir dieselbe gemessen in Dyn, wenn wir dabei als Einheit der Masse 1 g und als Einheit der Beschleunigung 1 (cm sec^{-2}) verwenden.

Die Dimension der Kraft entspricht daher nach der Gleichung $[l\,t^{-2}] \cdot [m] = [l\,t^{-2}\,m]$ dem Ausdrucke $[l\,t^{-2}\,m]$ und ein Dyn ist 1 (cm sec^{-2} g).

Um verschiedene Massen miteinander zu vergleichen, messen wir ihr Gewicht, da dieses das Product aus Masse und Beschleunigung ist und letztere für alle Körper denselben Wert hat.

Ein Gramm Gewicht stellt also eine Kraft von 981 Dyn dar, weil seine Masse durch die Schwerkraft eine Beschleunigung von 981 (cm sec^{-2}) erfährt; ein kg Gewicht enthält demnach 981000 Dyn.

Der freie Fall und der verticale Wurf.

Wenn ein frei beweglicher Körper von einem bestimmten Augenblicke angefangen ausschließlich der Beschleunigung der Schwerkraft g Folge leistet, so bezeichnen wir seine Bewegung als den „freien Fall“.

Von der früher beschriebenen Bewegung beim freien Falle unterscheidet sich die beim sogenannten verticalen Wurfe nur dadurch, dass sich der Körper zugleich mit gleichförmiger Geschwindigkeit vertical nach unten oder oben bewegt. In diesem Falle muss also der Körper zwei Bewegungen gleichzeitig ausführen, und daher bezeichnet man das Resultat derselben als eine zusammengesetzte Bewegung.

Haben beide Bewegungen denselben Sinn, so bewegt sich der Körper schon vom Augenblicke $t = 0$ angefangen, mit der Geschwindigkeit c nach unten, und die in den einzelnen Secunden zurückgelegten Wege werden noch um die entsprechenden Strecken beim freien Falle vermehrt.

Der mit gleichförmiger Bewegung in t Secunden zurückgelegte Weg sei

$$s_1 = ct,$$

und der durch den freien Fall zurückgelegte Weg $s_2 = {}^1/_2 g t^2$,
für die zusammengesetzte Bewegung erhalten wir also die Summe der beiden Wege

$$s_1 + s_2 = s = ct + {}^1/_2 g t_2.$$

Geben wir dem Körper zu Beginn der Bewegung eine Geschwindigkeit c nach aufwärts, so wird der in dieser Richtung abgeschleuderte Körper nach t Secunden den Weg

$$s = ct - {}^1/_2 g t^2$$

zurückgelegt haben, und die Geschwindigkeit nach Ablauf dieser Zeit wird der Formel

$$v = c - gt$$

entsprechen; während sie im früheren Falle dem Ausdrucke

$$v = c + gt$$

zufolge immer mehr zunimmt, nimmt sie beim verticalen Wurfe nach oben solange ab, bis sie den Wert Null annimmt, wenn

$$c = gt \text{ und daher } t = \frac{c}{g}.$$

Da von diesem Augenblicke an der Wert von v sein Zeichen wechselt, so wird sich zugleich der Sinn der Geschwindigkeit ändern und die steigende Bewegung des verticalen Wurfes in die des freien Falles übergehen. Den Wert von $t = \frac{c}{g}$ bezeichnet man als die „Steigzeit“ und den dabei zurückgelegten Weg $s = c \cdot \frac{c}{g} - \frac{g}{2} \cdot \left(\frac{c}{g}\right)^2 = \frac{c^2}{2g}$ als die „Steighöhe“. Die Zeit, die der Körper braucht, um aus dieser Höhe herabzufallen, ergibt sich aus der Formel

$$\frac{c^2}{2g} = \frac{gt^2}{2}.$$

Es ist daher wieder $t = \frac{c}{g}$, also die Steigzeit gleich der Fallzeit ist und aus der Formel

$$v = gt = g \cdot \frac{c}{g} = c$$

ergibt sich noch, dass der Körper mit derselben Geschwindigkeit unten ankommt, mit der er von hier aus emporgeschleudert wurde.

Nicht nur bei der Fallmaschine, wo das Übergewicht nebst der Hauptlast auch die kinetische Trägheit der Rolle und die mit ihrer Drehung verbundene Reibung überwinden muss, sondern schon beim freien Fall zeigt sich bei vielen Körpern eine merkliche Abweichuug von der Geschwindigkeit, welche der Körper vermöge der Beschleunigung der Schwerkraft annehmen sollte. Besonders auffallend ist das Zurückbleiben sehr leichter und doch ziemlich ausgedehnter Körper, z. B. eines Blattes Papier oder einer Flaumfeder. Soll nämlich ein solcher Körper eine größere Geschwindigkeit annehmen, so muss er gleichzeitig eine derartig große Menge von Luft mit in Bewegung versetzen, dass das Gewicht des Körpers kaum ausreicht, dieselbe rasch genug zu verdrängen. Dass in ähnlichen Fällen nur der Luftwiderstand das Bewegungshindernis bildet, ergibt sich daraus, dass in einer luftleeren Röhre Papierstücke und Flaumfedern gerade so rasch niederfallen wie ein Stück Blei.

Den Widerstand, welcher sich in einem mit Flüssigkeit oder Luft erfüllten Raum der freien Bewegung der Körper entgegenstellt, bezeichnet man als den „Widerstand des Mittels“. Dieser wird um so stärker, je größer die Masse des Mittels ist, welches verdrängt werden muss, und er wächst mit dem Quadrate der Geschwindigkeit des Körpers. Wenn nämlich dieselbe c mal größer ist, so wird gleichzeitig nicht nur eine c mal größere Menge des Mittels in Bewegung versetzt, sondern dessen Masse muss auch noch eine c mal größere Geschwindigkeit annehmen, und setzt daher auch der Beschleunigung einen c^2 mal größeren Widerstand entgegen. Der Widerstand des Mittels wirkt auf den bewegten Körper wie eine Kraft von entgegengesetzter Richtung. Ein zweites Bewegungshindernis ist die erst später zu erörternde „Reibung“.

Die Arbeit.

Auch der mechanische Begriff der Arbeit steht mit dem gleichlautenden Begriff im praktischen Leben in einem sinngemäßen Zusammenhang.

Hier wie dort kommt es nicht allein auf große Kraftentfaltungen an, sondern auch auf die Größe des Gebietes, über welches sich die erfolgreiche Thätigkeit der Kräfte erstreckt. Sehen wir vorläufig von der Zeit ab, so müssen wir nebst der Kraft auch ihr Arbeitsgebiet der Messung unterziehen, damit der Arbeitsbegriff zur mathematisch berechenbaren Größe werde.

Es ist offenbar für die Arbeitsleistung eines Pferdes nicht gleichgiltig, ob es auf steiniger Straße einen Wagen 100 oder 200 m weit zieht, und auch die Wucht des Sturzes wird viel größer, wenn die Schwerkraft die Geschwindigkeit des frei fallenden Körpers einer größeren Höhe entlang beschleunigt. Bei der Verfrachtung größerer

Lasten auf der Eisenbahn werden die Kosten nicht nur nach dem Gewichte, sondern auch nach der Länge des Weges bemessen, auf welche die Beförderungsarbeit sich bezieht. In allen diesen Fällen erstreckt sich die Wirksamkeit der Kraft über einen gewissen Weg, dessen Länge für die Arbeitsleistung maßgebend ist. Wir werden daher eine Arbeit als k mal größer bezeichnen, wenn die aufgewendete Kraft k mal größer ist, und wir legen ihr auch eine l mal größere Maßzahl bei, wenn der Weg, längs welchem diese Kraft wirksam war, l mal länger ist. Ist also die Kraft k mal größer und der Weg l mal länger, so ist die geleistete Arbeit kl mal größer.

Wir definieren daher die Arbeit als mechanische Größe, indem wir sie als das Product aus der Kraft und der Länge des Weges hinstellen, längs dessen diese Kraft aufgewendet wurde.

Daraus ergibt sich die Dimension des mechanischen Begriffes „Arbeit", indem wir die Dimension der Kraft mit der des Weges multiplicieren, und so erhalten wir den Ausdruck $[l \, . \, t^{-2} \, m] \, . \, [l] = [l^2 \, t^{-2} \, m]$.

Hat ein Körper frei fallend den Weg s zurückgelegt, so ist die von der Schwerkraft geleistete Arbeit gleich dem Producte aus der Kraft mg und der Strecke s und entspricht also dem Ausdrucke mgs.

Aus $v = gt$ folgt aber $g = \frac{v}{t}$ und wegen $s = \frac{gt^2}{2} = \frac{v}{2t} \, . \, t^2 = \frac{vt}{2}$, ist die Arbeit $mgs = m \, . \, \frac{v}{t} \, . \, \frac{vt}{2} = \frac{mv^2}{2}$.

Dass dieser Ausdruck einer „Arbeit" entspricht, folgt unmittelbar auch aus der Dimension desselben, denn $[mv^2] = [m] \, [l^2 \, t^{-2}] = [l^2 \, t^{-2} \, m]$.

Diese Arbeit vermag der Körper sofort wieder zu leisten, wenn er in seiner Bewegung plötzlich aufgehalten wird; sie entspricht einigermaßen dem Sinne des Wortes „die Wucht der Bewegung", und man hat ihr seinerzeit den Namen „lebendige Kraft" gegeben, zum Unterschied von jener Arbeit, welche gewissermaßen als „todte Kraft" in einem Körper unthätig aufgespeichert bleibt, wenn man ihn zuerst auf eine gewisse Höhe gehoben hat und ihn an jeder Bewegung hindert. Da ferner der gehobene Körper diese Arbeit sofort wieder leisten kann, wenn man ihn aus jener Höhe herabfallen lässt, so bezeichnet man sie auch als „potentielle Energie", und da dieselbe durch eine höhere Lage bedingt ist, als „Energie der Lage". Fällt der Körper aus dieser Höhe frei herab, so geht die „potentielle" in „kinetische Energie" oder „Energie der Bewegung" über.

Wollen wir die Einheit der Arbeit aufstellen, so müssen wir die Kraft von 1 Dyn längs eines Centimeters ausüben, und die daraus sich ergebende Arbeit bezeichnen wir als „ein Erg". Wir können uns von der Größe eines „Erg" wenigstens annäherungsweise eine Vorstellung machen, wenn wir uns daran erinnern, dass ein Grammgewicht die Kraft von 981 Dyn darstellt und daher die Kraft eines Dyn nahezu dem Gewichte eines Milligramm entspricht; wenn wir demnach 1 Milligramm einen Centimeter hoch heben, so leisten wir ungefähr eine Arbeit von „1 Erg". Diese Arbeit ist so gering, dass sie bei den Messungen im praktischen Leben allzugroße Maßzahlen erfordern würde. Man verwendet daher statt dieser „absoluten Einheit" ein Vielfaches derselben als „praktische Einheit" und zwar hat man sich mit Rücksicht auf andere praktische Einheiten auf dem internationalen Congress der Elektrotechniker in Paris im Jahre 1881 für 10^7 Erg entschieden und dieselben als „ein Joule" bezeichnet, da der englische Physiker Joule zuerst die Beziehung der Wärmeeinheit zur Arbeitseinheit auf experimentellem Wege nachgewiesen hat.

Wenn wir statt eines Milligrammes 1 Kilogramm, also ein 1000000 mal größeres Gewicht, und zwar 10 cm hoch heben, so haben wir angenähert die Arbeit von einem Joule geleistet.

Als Arbeitseinheit wird auch jene Arbeit verwendet, die man leisten muss, um 1 Kilogramm einen Meter hoch zu heben, und diese ist daher gleich dem Producte von 981000 Dyn und 100 cm oder 98100000 Erg. Ein Kilogrammmeter ist mithin gleich 9·81 Joule.

Effect.

Zu den mechanischen Grundbegriffen gehört noch der des Effectes, bei dem die Arbeitsleistung auf die Zeit bezogen wird. Wir leisten z. B. genau dieselbe Arbeit, wenn wir das eine Mal sehr langsam und ein zweites Mal sehr rasch bis zum dritten Stockwerk eines Hauses emporsteigen. Wir haben aber im zweiten Falle das Gefühl, uns mehr angestrengt zu haben; das kommt daher, weil wir dieselbe Arbeit in einer viel kürzeren Zeit geleistet, also einen größeren „Arbeitseffect" erzielt haben.

Wenn auf gleiche Zeiträume immer auch gleiche Arbeitsleistungen entfallen, so bezeichnen wir als „Effect" den Quotienten aus der geleisteten Arbeit und der dazu verwendeten Zeit.

Die Dimension des Effectes ergibt sich aus folgender Gleichung:

$$[l^2\, t^{-2}\, m]\ [t^{-1}] = [l^2\, t^{-3}\, m],$$

und die Einheit des Effectes, indem wir für l, t und m, beziehungsweise cm, sec, und g einführen; wir bezeichnen sie daher mit (cm^2 sec^{-3} g). Die Einheit des Effectes definieren wir also damit, dass wir sagen, es soll die Arbeit von einem Erg in jeder Secunde geleistet werden. Die absolute Einheit des Effectes ist demnach ein „Erg pro Secunde".

Wie das Erg für praktische Messungen viel zu klein war, so ist dies auch bei der Einheit des Effectes der Fall, und deshalb verwendet man als praktische Einheit 10^7 „Erg pro Secunde" und bezeichnet dieselbe zu Ehren des Erfinders der Dampfmaschine als „ein Watt".

Da ein kg-Gewicht einer Kraft von 981000 Dyn entspricht, und 0·981 Joule nöthig sind, um dieses Gewicht 10 cm hoch zu heben, so entspricht diese Arbeit, wenn sie in einer Secunde geleistet wird, 0·981 Watt.

Eine andere noch gebräuchliche Einheit des Effectes ist die sogenannte „Pferdekraft" oder „Pferdestärke" (PS), die der Arbeitsleistung von 75 Kilogrammmetern in einer Secunde entspricht. Wird 1 kg in einer Secunde 100 cm hoch gehoben, so beträgt dieser Effect 98100000 Erg pro Secunde. Der 75 mal größere Effect einer Pferdestärke entspricht daher 7360000000 Erg pro Secunde, mithin ist eine Pferdestärke oder 1 PS = 736 Watt.

1000 Watt = 1 Kilowatt = 1·359 PS.

Zusammensetzung und Zerlegung von Bewegungen.

Wie es oft vorkommt, dass ein Körper mehrere Bewegungen nacheinander ausführt, so können auch alle Bedingungen für das gleichzeitige Eintreten derselben vorhanden sein. Wir haben bereits gelegentlich des verticalen Wurfes gesehen, wie sich ein Körper mit gleichförmiger Geschwindigkeit in verticaler Richtung bewegen und zugleich dem freien Falle folgen kann.

Die örtliche Verschiebung bleibt dieselbe, ob ein Körper mehrere Bewegungen nacheinander oder ob er sie gleichzeitig ausführt, ob dabei die einzelnen Bewegungen in dieser oder jener Reihenfolge zustande kommen. Die Berechtigung dieser Annahme ergibt sich daraus, dass alle darauf beruhenden Folgerungen der Bewegungslehre mit der Erfahrung übereinstimmen.

Der innere Zusammenhang zwischen den einzelnen Bewegungen, den „Componenten" und der „resultierenden" Gesammtverschiebung lässt sich sehr anschaulich verfolgen, wenn man sich zur Darstellung der Bewegungen der „Vectoren" bedient.

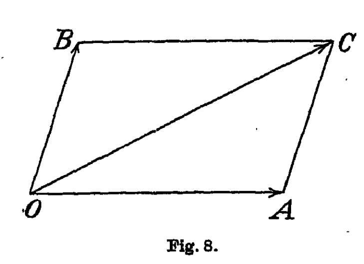


Fig. 8.

OA (Fig. 8) sei der Vector einer Bewegung, vermöge welcher der Punkt P in der Zeit t von O nach A gelangt, und in derselben Zeit erreiche er den Punkt B, wenn er die Bewegung mit dem Vector OB ausführt. Kommen beide Bewegungen nacheinander zustande, so wird er sich zuerst nach A und dann nach C bewegen und zu diesen beiden Bewegungen auch $2\,t$ Secunden benöthigen; wenn er aber beide Bewegungen gleichzeitig ausführt, so wird er schon nach t Secunden den Endpunkt C, aber auf dem Wege OC erreichen.

Den Endpunkt dieser Bewegung erhalten wir durch Construction, indem wir entweder die von O ausgehenden Vectoren OA und OB zu einem Parallelogramm ergänzen und in demselben von O aus die Diagonale ziehen, oder indem wir den Anfangspunkt des zweiten Vectors OB in den Endpunkt A des ersten verlegen und dann den Anfangspunkt O des ersten Vectors mit dem Endpunkte C des letzteren verbinden.

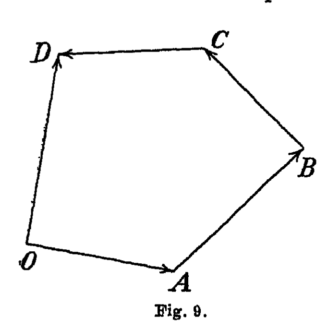


Fig. 9.

Wie wir auf diesem Wege die Wirkungsweise von zwei gleichzeitig eintretenden Bewegungen ermitteln können, so lässt sich mit Hilfe der Vectoren das Gesammtergebnis auch für beliebig viele Bewegungen durch eine einfache Construction ermitteln, indem wir immer den Anfangspunkt des nächstfolgenden Bewegungs-Vectors in den Endpunkt des vorausgehenden verlegen und schließlich den Anfangspunkt des ersten Vectors mit dem Endpunkte des letzten verbinden, wodurch wir den Vector der resultierenden Bewegung erhalten. So ist z. B. (Fig. 9) OD der Vector der aus den Bewegungen OA, AB, BC und CD resultierenden Bewegung.

Geben die Vectoren der Bewegungen, die zusammengesetzt werden sollen, ein geschlossenes Polygon, fällt also der Endpunkt des letzten Vectors mit dem Anfangspunkt des ersten zusammen, so heben sich alle diese Bewegungen gegenseitig auf, und der Punkt, der diese Bewegungen gleichzeitig ausführen soll, bleibt in Ruhe.

Da es sich hiebei immer um die innerhalb gleicher Zeiträume eintretenden Verschiebungen handelt, so ist es für die Zusammensetzung von Bewegungen vollkommen gleichgiltig, ob die einzelnen Wege mit gleichförmiger, gleichförmig beschleunigter oder ungleichförmig beschleunigter Bewegung zurückgelegt wurden.

Soll ein Körper mehrere Bewegungen nach verschiedenen Richtungen ausführen, so kann die Bahn, die er einschlägt, gerad- oder krummlinig sein. Damit (Fig. 10) die Punkte $C\,C_1\,C_2$, die sich aus der Zusammensetzung der Vectoren OA und OB, beziehungsweise OA_1 und OB_1, OA_2 und OB_2 u. s. w. ergeben, in gerader Linie liegen, müssen die Strecken OA, OA_1, OA_2 den Strecken $AC = OB$, $A_1C_1 = OB_1$, $A_2C_2 = OB_2$ u. s. w. proportional sein. Bewegt sich demnach ein Körper in der Richtung OA mit der constanten Geschwindigkeit c_1 und in der Richtung OB mit der Geschwindigkeit c_2, so würde er in der Zeit t in der ersteren Richtung den Weg $s_1 = c_1 t$ und in der letzteren die Strecke $s_2 = c_2 t$ zurücklegen; das Verhältnis dieser Wege ist aber $s_1 : s_2 = c_1 : c_2$ und daher unveränderlich wie c_1 und c_2; die aus der Zusammensetzung dieser Bewegungen sich ergebende Bahn wird also eine geradlinige sein.

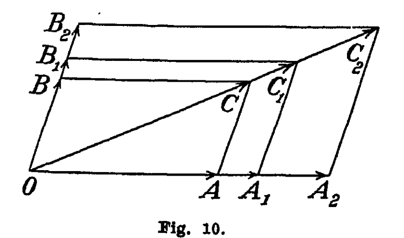


Fig. 10.

Sind diese beiden Bewegungen gleichförmig beschleunigt, also der in der einen Richtung zurückgelegte Weg $s_1 = \frac{1}{2} a_1 t^2$ und in der anderen Richtung $s_2 = \frac{1}{2} a_2 t^2$, so besteht wieder die Proportion $s_1 : s_2 = a_1 t^2 : a_2 t^2 = a_1 : a_2$, und die sich ergebende Bahn ist daher wieder eine geradlinige, weil das Verhältnis $a_1 : a_2$ ebenfalls constant bleibt.

Anders verhält es sich, wenn die Bewegung nach der einen Richtung gleichförmig und nach der anderen Richtung eine gleichförmig beschleunigte ist. Bilden wir wieder das Verhältnis $s_1 : s_2 = ct : \frac{1}{2} a t^2 = \frac{2c}{at}$, so sehen wir, dass dieser Ausdruck die Zeit t enthält und daher mit zunehmender Zeit kleiner wird. Die Endpunkte der resultierenden Vectoren liegen also nicht mehr in einer Geraden, und die Bahn wird daher eine gekrümmte sein. Dies trifft thatsächlich beim horizontalen und beim schiefen Wurfe zu.

Der horizontale und der schiefe Wurf.

Geben wir einem Körper in horizontaler Richtung die Geschwindigkeit c, wie es z. B. der Fall ist, wenn wir eine Gewehrkugel in horizontaler Richtung abschießen, so müsste sich derselbe vermöge seiner kinetischen Trägkeit im luftleeren Raume ohne Ende mit derselben Geschwindigkeit in dieser Richtung fortbewegen, wenn nicht die Schwerkraft ihn von seiner geradlinigen Bahn ablenken würde. Sehen wir zunächst von den Bewegungshindernissen ab, so ergibt sich durch die Zusammensetzung einer gleichförmigen und einer gleichförmig beschleunigten Bewegung eine krummlinige Bahn, deren Gestalt wir durch Rechnung oder durch Construction ermitteln können.

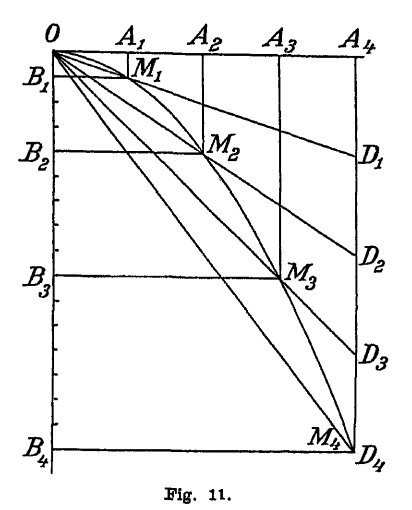


Fig. 11.

Wir tragen zu diesem Zwecke (Fig. 11) auf einer Geraden OA, die in gleichen Zeiten zurückzulegenden Wege als gleiche Strecken auf, und längs der verticalen Geraden OB die den Gesetzen des freien Falles entsprechenden Wege, und erhalten so die Punkte M, nach welchen der Körper nach 1, 2, 3 . . . Zeitintervallen gelangt.

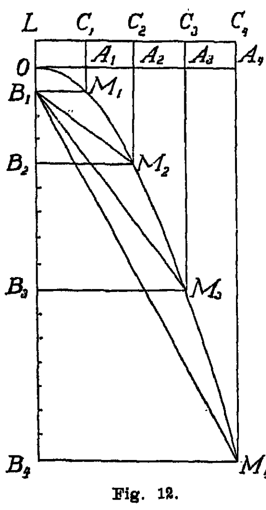


Fig. 12.

Zu denselben Punkten gelangen wir auch durch folgende einfache Construction: Die Gerade OM_1 (Fig. 11) schneidet die verticale Gerade durch A_4 in einem Punkte D_1, und wenn wir diese Strecke A_4D_1 in derselben Richtung 4 mal auftragen, so geben die Geraden OD_2, OD_3 und OD_4 durch ihre Durchschnittspunkte mit den verticalen Geraden durch A_1, A_2, A_3 und A_4 die 4 Punkte M_1, M_2, M_3 und M_4 der gesuchten Bahn. Das ist aber eine von den vielen Constructionen, mit deren Hilfe man die Punkte einer krummen Linie findet, die man „Parabel" nennt.

Eine andere Construction der Parabel ist die mit Hilfe der Leitlinie (Fig. 12). Der in der Secunde in horizontaler Richtung zurückgelegte Weg sei

$$OA_1 = A_1 A_2 = A_2 A_3 = A_3 A_4 = 2$$

Die Beschleunigung in verticaler Richtung sei gleich 2, also der in der 1. Secunde zurückgelegte Weg $OB_1 = 1$, ferner $OL = OB_1 = A_1 C_1 = A_2 C_2 = \ldots = 1$; dann ist

$$B_1 M_1 = \sqrt{O + B_1 M_1^2} = \sqrt{0 + 2^2} = 2 = M_1 A_1 + A_1 C_1 = 1 + 1 = M_1 C_1$$
$$B_1 M_2 = \sqrt{B_1 B_2^2 + B_2 M_2^2} = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 = M_2 A_2 + A_2 C_2 = 4 + 1 = M_2 C_2$$
$$B_1 M_3 = \sqrt{B_1 B_3^2 + B_3 M_3^2} = \sqrt{8^2 + 6^2} = 10 = M_3 A_3 + A_3 C_3 = 9 + 1 = M_3 C_3$$
$$B_1 M_4 = \sqrt{B_1 B_4^2 + B_4 M_4^2} = \sqrt{15^2 + 8^2} = 17 = M_4 A_4 + A_4 C_4 = 16 + 1 = M_4 C_4$$

u. s. w.

Es zeigt sich also, dass alle Punkte M vom Brennpunkte B_1 und der Leitlinie LC_4 gleichweit entfernt, mithin Punkte einer Parabel sind.

In der analytischen Geometrie wird die Parabel als die Gesammtheit aller Punkte definiert, deren Coordinaten der Gleichung $y^2 = 2px$ genügen.

Setzen wir $OA = ct = y$ und $OB = \frac{1}{2}gt^2 = x$,
dann folgt aus der ersteren Gleichung $t = y : c$, also $t^2 = y^2 : c^2$
und aus der zweiten Gleichung, dass $t^2 = 2x : g$;
daher ist $\frac{y^2}{c^2} = \frac{2x}{g}$ und $y^2 = \frac{2c^2}{g} \cdot x = 2px$, wenn $p = \frac{c^2}{g}$.

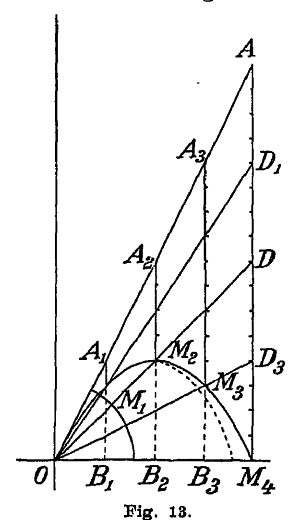


Fig. 13.

Wenn sich der Körper schief nach oben bewegt, so müssen wir seine Geschwindigkeit c in eine horizontale und in eine verticale Componente zerlegen. Letztere gibt verbunden mit dem freien Fall eine dem verticalen Wurf nach oben entsprechende Bewegungscomponente, und diese wird mit der gleichförmigen Bewegung in horizontaler Richtung zusammengesetzt.

Schließt die Wurfrichtung mit der horizontalen Geraden den Winkel $\alpha = BOA$ ein (Fig. 13), so ist die verticale Componente $c_1 = c \cdot \sin\alpha$ und die horizontale $c_2 = c \cdot \cos\alpha$.

Der Ausdruck für die Steigzeit erhält daher die Form: $t = \frac{c \sin\alpha}{g}$;

die Fallzeit muss wieder so groß wie die Steigzeit sein; während dieser beiden Zeiträume, $2t$, legt der Körper mit der Geschwindigkeit $c \cdot \cos\alpha$ die Strecke

$$s = 2t \cdot c \cdot \cos\alpha = \frac{2c^2}{g} \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha = \frac{c^2}{g} \cdot \sin 2\alpha$$

in der Richtung OB zurück. Die Strecke OM_4 bezeichnet man als die „Wurfweite". Diese erreicht ihren größten Wert, wenn $\sin 2\alpha = 1$, also $\alpha = 45^0$; die maximale Wurfweite ist mithin $c^2 : g$.

Weil außerdem $\sin 2 (45 + \delta) = \sin 2 (45 - \delta)$, so folgt hieraus, dass die Wurfweite denselben Wert annimmt, wenn der Neigungswinkel um gleichviel über oder unter 45^0 liegt.

Wenn die Wurfbewegung im lufterfüllten Raume erfolgt, so wird die Form der Wurfbahn durch den Widerstand der Luft ziemlich stark verändert und die Wurfweite dementsprechend kürzer, weil nicht nur die verticale, sondern auch die horizontale Geschwindigkeitscomponente abnimmt.

Zusammensetzung und Zerlegung von Kräften.

Da für jede Kraft wie für die Bewegung der Ausgangspunkt, die Größe, die Richtung und der Sinn die wesentlichen Merkmale sind, so kann man auch die Kräfte durch Vectoren darstellen. Wir wählen daher den Angriffspunkt der Kraft als Anfangspunkt des Vectors, machen dessen Länge gleich der Größe der Kraft, ebenso müssen auch Richtung und Sinn für beide übereinstimmen. Die Zusammensetzung der Vectoren gibt uns dann die vereinigte Wirkung der Kräfte an und führt zur Construction der Resultierenden aus den Componenten.

Sollen zwei in einem Punkte angreifende Kräfte zusammengesetzt werden, so brauchen wir nur die von diesem Punkte ausgehenden Vectoren zu einem Parallelogramme zu ergänzen; dann gibt uns die von jenem Punkte ausgehende Diagonale den Vector der resultierenden Kraft an.

Bei der Zusammensetzung von mehr als zwei Kräften finden wir den Vector der Resultanten, indem wir den Anfangspunkt jedes folgenden Vectors in den Endpunkt des vorausgehenden verlegen und schließlich den Anfangspunkt des ersten mit dem Endpunkte des letzten verbinden. Diese beiden Constructionen sind unter dem Namen „Kräfteparallelogramm" und „Kräftepolygon" bekannt.

Andererseits können wir uns eine derartige Reihe von Vectoren construieren, dass die ihnen entsprechenden Kräfte dieselbe Wirkung hervorbringen würden, wie eine einzige Kraft, deren Vector wir kennen. Damit haben wir dieselbe in Componenten zerlegt.

Fig. 14.

Dass sich die Kräfte wirklich in einer diesen Constructionen entsprechenden Weise zerlegen lassen, lässt sich dadurch zeigen, dass man der Resultierenden mehrerer Kräfte eine andere Kraft entgegensetzt, welche dieselbe Größe und Richtung, aber entgegengesetzten Sinn hat, wodurch die Wirkung der Kräfte vollständig aufgehoben wird.

Gehen von einem in A (Fig. 14) befindlichen Knoten zwei Schnüre AC und AB aus, an welchen Gewichte von 4, beziehungsweise 3 kg hängen, so können wir dem Zuge derselben durch ein Gewicht von 6 kg das Gleichgewicht halten. Dass Größe,

Richtung und Sinn der Resultierenden mit der Länge und Lage des Vectors AA' übereinstimmen, beweist folgender Versuch: Verschieben wir den Knoten A aus der Gleichgewichtslage, so kehrt er immer wieder in eine solche Stellung zurück, bei der die Schnüre AB und AC mit der Verlängerung von AA'' dieselben Winkel einschließen, wie die Vectoren von der Länge 3, 4 und 6, welche das geschlossene Dreieck ABA' geben.

Diesen Gleichgewichtszustand können wir sowohl in dem Sinne auffassen, dass wir die Resultierende der Componenten AB und AC durch die Kraft AA'' aufgehoben haben, oder dass die Kraft AA' in die Componenten AB und AC zerlegt wurde.

Ist die Resultierende mehrerer Kräfte gleich Null, so heben sie sich gegenseitig auf; dies ist der Fall, wenn die Vectoren dieser Kräfte ein geschlossenes Polygon bilden und daher der Endpunkt des letzten Vectors in den Anfangspunkt des ersten fällt. Jedes geschlossene Polygon von Vectoren stellt also ebensoviele Kräfte dar, die sich gegenseitig das Gleichgewicht halten. Sehen wir andererseits, dass mehrere Kräfte von verschiedener Größe und Richtung sich das Gleichgewicht halten, so müssen ihre Vectoren ein geschlossenes Polygon bilden.

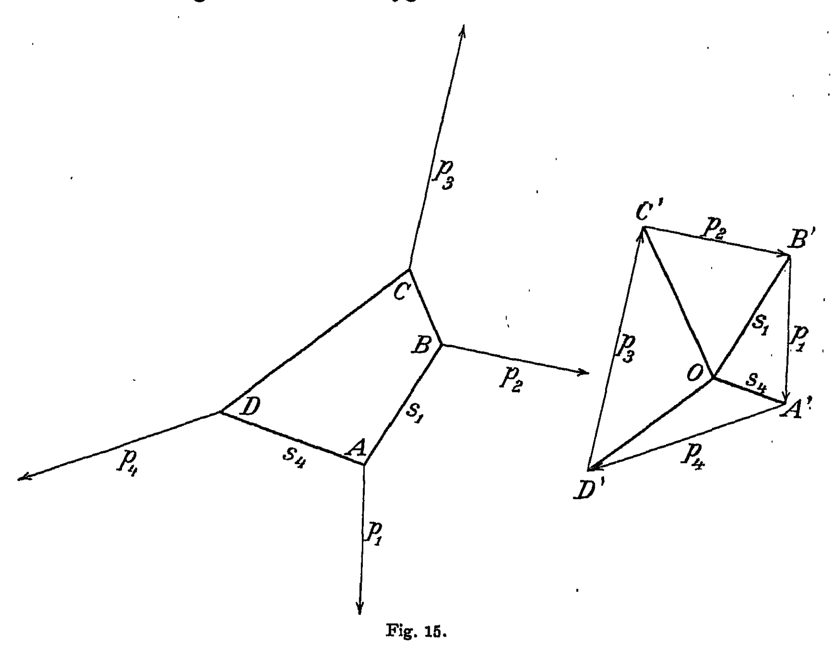


Fig. 15.

Die Wechselbeziehung zwischen Größe und Richtung mehrerer Kräfte zeigt sich besonders klar, wenn man dieselben an einzelnen Stellen einer in sich geschlossenen Schnur angreifen lässt, wodurch die Schnur die Gestalt eines Polygons annimmt, welches man als das „Seilpolygon" bezeichnet. Construieren wir für die am Umfange des „Seilpolygons" angreifenden Kräfte das „Kräftepolygon", so besteht zwischen diesen beiden Figuren folgende ebenso einfache als wichtige Beziehung.

(Fig. 15.) p_1, p_2, p_3 und p_4 seien die Vectoren der in den Punkten A, B, C und D angreifenden Kräfte. Damit im Punkte A Gleichgewicht herrsche, müssen die Spannungen in den Schnurstücken AB und AD, wir wollen sie mit s_1 und s_4 bezeichnen, der Kraft p_1 das Gleichgewicht halten; wenn wir also in einer zweiten Figur zuerst den Vector $A'\,B' = p_1$ und durch dessen Endpunkte zwei zu den Spannungen s_1 und s_4 parallele Gerade zeichnen, so stellt das Dreieck $A'B'O$ das entsprechende Kräftepolygon dar, und die

Strecken $A'O$ und $B'O$ geben die in den Schnurstücken AB und AD herrschenden Spannungen an. Construieren wir dann vom Punkte B' aus den Vector p_2 und durch B' und C' die zu AB und BC parallelen Geraden $B'O$ und $C'O$, so geben uns diese Strecken die Spannungen s_1 und s_2 in den Schnurstücken AB und BC an. Der Durchschnittspunkt von s_4 mit s_1 muss derselbe sein, wie der von s_1 und s_2, weil wir sonst im Schnurstücke AB zwei verschiedene Spannungswerte hätten. Construieren wir noch vom Punkte C' aus den Vector p_3 und von dessen Endpunkte aus die zu CD parallele Gerade $D'O$, so ist deren Länge ein Maß für die Spannung s_3 in dem Schnurstücke CD. Wenn die Spannungen s_3 und s_4 der Kraft p_4, die in D angreift, das Gleichgewicht halten sollen, so müssen die Vectoren $D'A'$ mit $D'O$ und $A'O$ ebenfalls ein geschlossenes Dreieck bilden. $A'B'C'D'$ ist das dem Seilpolygon $ABCD$ entsprechende Kräftepolygon.

Ziehen wir durch die Eckpunkte des Kräftepolygons Parallele zu den Seiten des Seilpolygons, so schneiden sie sich alle in einem Punkte O, und die Längen dieser Strecken entsprechen den in den parallelen Schnurstücken herrschenden Spannungen. Die Construction des Seilpolygons im Zusammenhange mit dem Kräftepolygon bildet das Grundproblem der „graphischen Statik", mit Hilfe deren man auf constructivem Wege die in einem Stabsystem herrschenden Zug- und Druckverhältnisse findet. Durch eine ihnen entsprechende Wahl der Querschnitte kann man der ganzen Construction jene Festigkeit geben, welche unter gewissen Verhältnissen z. B. bei Brückenbauten erforderlich ist.

Wenn zwei Kräfte AA' und BB' an verschiedenen Punkten A und B eines starren Körpers angreifen (Fig. 16), und die Verlängerungen ihrer Richtungen schneiden sich innerhalb des Körpers, so können wir den Angriffspunkt beider Kräfte in den Durchschnittspunkt O verlegen und in der bekannten Weise die Resultierende OO' construieren. Jede in einem beliebigen Punkte derselben, z. B. in C angreifende Kraft von gleicher Stärke, aber entgegengesetztem Sinn vermag den beiden andern Kräften AA' und BB' das Gleichgewicht zu halten. Wenn jedoch der Durchschnittspunkt O der Kräfte außerhalb des Körpers fällt, so versagt diese Construction, weil O mit den Angriffspunkten der Kräfte nicht mehr fest verbunden ist.

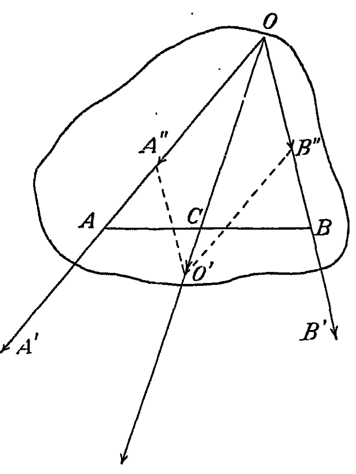


Fig. 16.

AA' und BB' (Fig. 17) seien die Vectoren zweier Kräfte, deren Richtungen sich außerhalb des Körpers schneiden. Dann suchen wir einen außerhalb der Verbindungslinie AB liegenden Punkt C des Körpers auf, der mit A und B ein Dreieck bildet, das wir als Seilpolygon verwenden können.

Wir construieren das Kräftepolygon $A''B''C''$, welches uns Größe, Richtung und Sinn der Resultierenden $A''C''$ liefert und wählen den Punkt O so, dass sich die zu den Geraden OA'',

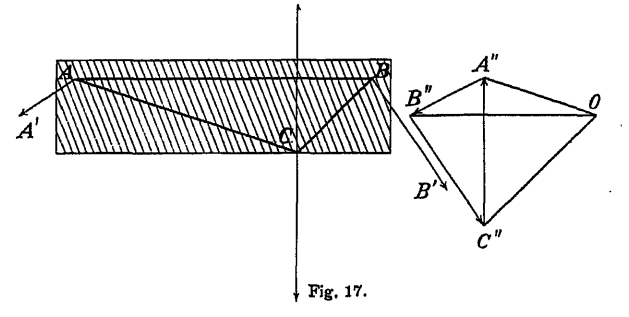


Fig. 17.

und OC'' parallelen Spannungsrichtungen s_1 und s_3 innerhalb des Körpers in C schneiden. Wenn wir diesen als Angriffspunkt der Resultierenden benützen, beziehungsweise in ihm eine gleich große Kraft von entgegengesetzter Richtung wirken lassen, so hält diese den beiden anderen Kräften das Gleichgewicht. Dabei ist darauf zu achten, dass die Strecken AC und BC, deren Vectoren $A''O$ (parallel zu AC) und $C''O$ (parallel zu CB) außerhalb des Kräftepolygons $A''B''C''$ fallen, nicht Zugspannungen, sondern den Druck darstellen, der in dieser Richtung im Körper herrscht.

Sind die Richtungen der Kräfte AA' und BB' parallel, so versagt die zuerst angeführte Construction abermals, weil die Verlängerung der Kraftrichtungen überhaupt zu keinem Durchschnittspunkte führt. Die Construction des Seilpolygons gestattet uns aber auch in diesem Falle noch die Größe und den Angriffspunkt der Resultierenden zu finden, ohne das Raumgebiet des Körpers zu verlassen.

Sind die Kräfte $AA' = p_1$ und $BB' = p_2$ parallel, so liegen alle drei Seiten des Kräftepolygons $A'AB''$ (Fig. 18) in ein und derselben Geraden,

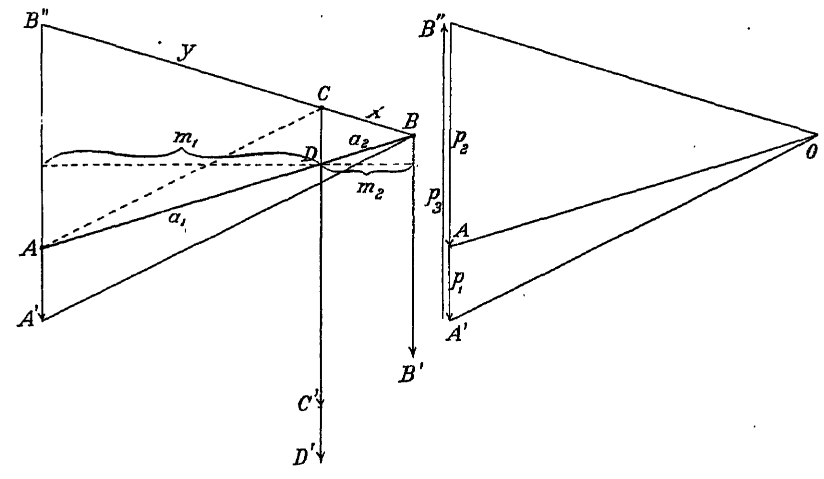


Fig. 18.

und die Resultierende p_3 hat dieselbe Richtung, wie die beiden Componenten p_1 und p_2. Die Eckpunkte des Kräftepolygons geben wieder, mit einem Punkte O verbunden, die Richtungen der Seiten des Seilpolygons ABC und die in ihnen herrschenden Spannungen s_1, s_2 und s_3. Wir ziehen daher BC parallel zu OB'' und AC parallel zu OA' und erhalten so den Punkt C, in welchem die Resultierende $CC' = p_3$ angreift.

Um nicht eine zweite Figur zeichnen zu müssen, kann man auch den verlängerten Vector AA' zur Construction des Kräftepolygons und den Punkt B statt des Punktes O verwenden. Wir haben dann nur die Gerade AC parallel zu $A'B$ zu ziehen, um den gesuchten Punkt C zu finden, und den Angriffspunkt der Resultierenden $B''A'$ können wir in den Punkt D auf der Geraden AB verlegen. Dabei muss $B''A' = CC' = DD'$.

Die Lage der Punkte C und D ergibt sich aus folgenden Proportionen: Weil AC parallel zu $A'B$ ist, so folgt $A'A : AB'' = x : y = p_1 : p_2$ und, da AB'' parallel ist zu CD, so muss $x : y = a_2 : a_1$.

Hieraus folgt, dass $p_1 : p_2 = a_2 : a_1$
und $a_1 p_1 = a_2 p_2$.

Diese Beziehung gilt für jeden schiefen Winkel, den die Gerade AB mit der Richtung der Kräfte einschließt.

Wenn wir von D aus auf AA' und BB' die Senkrechten m_1 und m_2 fällen, so besteht, da die Kräfte p_1 und p_2 parallel sind, die Proportion $a_1 : a_2 = m_1 : m_2$, und daraus folgt $p_1 : p_2 = m_2 : m_1$, mithin auch $m_1 p_1 = m_2 p_2$.

Das Product aus der Maßzahl einer Kraft p und ihrem Abstande von dem Punkte D auf der Geraden AB bezeichnet man als das Drehmoment der Kraft p in Bezug auf den Punkt D. Wir können daher den Satz aufstellen:

Der Angriffspunkt der Resultierenden zweier paralleler Kräfte ist jener Punkt der Verbindungslinie ihrer Angriffspunkte, für welchen die Drehmomente beider Kräfte gleich groß sind. Er theilt die Strecke AB in zwei Theile, die sich verkehrt verhalten, wie die an ihren Endpunkten angreifenden Kräfte.

Untersuchen wir die Dimension des Drehmomentes, so ergibt sich aus der Multiplication des Ausdruckes für die Kraft $[l t^{-2} m]$ mit der Dimension des Abstandes $[l]$ die Dimensions-Formel $[l^2 t^{-2} m]$, also dieselbe, welche auch dem Begriffe Arbeit zukommt.

Da die Schwerkraft in verticaler Richtung wirkt, so stellen alle Körpergewichte parallele Kräfte dar, deren Angriffspunkt sich nach der Massenvertheilung im Körper richtet.

Wenn die in den Punkten A und B angreifenden Kräfte AA' und BB' (Fig. 19) parallel sind, aber entgegengesetzten Sinn haben, so können wir die größere $p_2 = BB'$ nach den eben angegebenen Regeln in zwei Componenten zerlegen, deren eine AA'' der Kraft AA' das Gleichgewicht hält. Die zweite Componente CC' wird abermals dieselbe Richtung haben und ihre Größe wird gleich $p_2 - p_1$ sein. Da sich die Kraft p_1 und die erstgenannte Componente gegenseitig aufheben, so wirkt nur die zweite Componente im Punkte C, und es besteht die Proportion

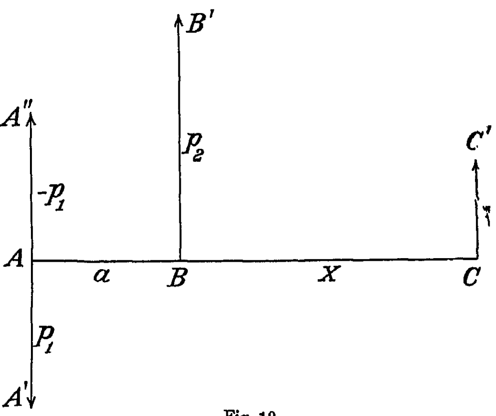


Fig. 19.

$$x : a = p_1 : (p_2 - p_1),$$

weshalb
$$x = \frac{a\, p_1}{p_2 - p_1}.$$

Der Angriffspunkt der Kraft $p_2 - p_1$ rückt also um so weiter fort, je weniger sich die beiden Kräfte p_2 und p_1 voneinander unterscheiden. Wenn schließlich $p_1 = p_2$, so bezeichnet man diese parallelen Kräfte als ein Kräftepaar oder einen Drehzwilling.

Ist in Fig. 20 ein beliebiger Punkt der Geraden AB, z. B. C unbeweglich, so rufen die Kräfte p_1 und p_2 eine Drehung um diesen Punkt hervor. Dieses Drehmoment setzt sich aus dem Drehmoment der Kraft p_2 in der Entfernung a_2 von C und dem Drehmoment der Kraft p_1 in der Entfernung a_1 von C zusammen. Die Summe dieser beiden im selben Sinne drehenden Momente ist also, wenn

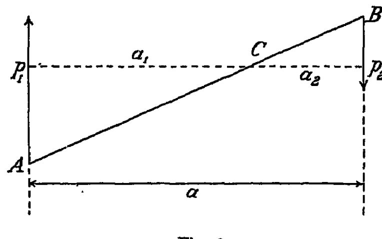


Fig. 20.

$$p_1 = p_2 = p \text{ und } a_1 + a_2 = a$$
$$p_1\, a_1 + p_2\, a_2 = p\, (a_1 + a_2) = pa.$$

Jedes Kräftepaar entspricht also einem Drehmomente, welches gleich ist dem Producte einer von beiden Kräften und dem gegenseitigen Abstande derselben.

Der Satz, dass für den Angriffspunkt der Resultierenden die Momente der Componenten gleich sind, trifft auch zu, wenn die in A und B angreifenden Kräfte weder gleich noch parallel sind. Verlängern wir nämlich die Vectoren AA' und BB' (Fig. 21) bis zu ihrem Durchschnittspunkte O und benützen wir denselben als Eckpunkt des Kräfteparallelogrammes $OA''\ O'B''$, um mit Hilfe der Diagonale den Angriffspunkt C der Resultierenden zu finden, so sind die Dreiecke $CA''O$ und $CB''O$ dem Flächeninhalte nach gleich der Hälfte des Momentes jeder dieser Kräfte in Bezug auf den Punkt C; da diese beiden Dreiecke eine gemeinsame Grundlinie OC und auch gleiche Höhen h besitzen, so müssen auch die Drehmomente dieser beiden Kräfte in Bezug auf den Punkt C gleich sein.

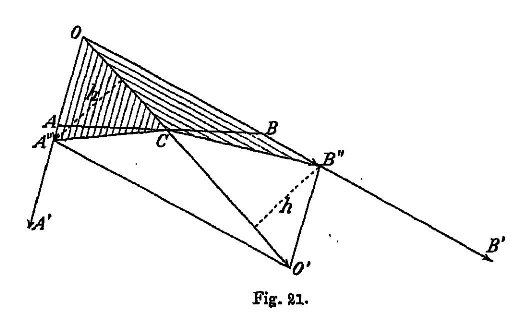


Fig. 21.

Der Schwerpunkt.

Die Schwerkraft wirkt nicht auf den Körper als Ganzes, sondern auf jeden seiner verschiedenen Massentheile, denn jeder derselben besitzt sein eigenes Gewicht, sobald er vom Ganzen getrennt ist. Auf alle Theile des Körpers wirken demnach parallele Kräfte, welche sich durch eine einzige ersetzen lassen, weil bei jedem festen Körper die Bewegung der einzelnen Theile infolge ihrer unveränderlichen Entfernungen von den Bewegungen der übrigen abhängig ist.

Zwei gleiche Massen an den Endpunkten einer Strecke ergeben eine Resultierende, welche gleich ist der Summe der beiden Gewichte, und der Angriffspunkt für diese Kraft ist der Halbierungspunkt dieser Strecke.

Bei einer geradlinigen Strecke, auf der die Massen gleichmäßig vertheilt sind, liegt der Angriffspunkt der dem Gewichte aller Massen entsprechenden Kraft ebenfalls im Mittelpunkte, denn in diesem Punkte greifen die Resultierenden aller zu ihm symmetrisch vertheilten Massen an. Die Wirkung ist also dieselbe, als ob nur dieser Punkt der Schwerkraft unterliegen würde und

in ihm alle Massen vereinigt wären; daher nennt man diesen Punkt auch den „Schwerpunkt der Strecke“, während er streng genommen nur Schwerpunkt aller Massen auf der ganzen Strecke ist. Desgleichen liegt bei einem durchwegs aus demselben Material gefertigten geraden Stab der Schwerpunkt im Mittelpunkt.

Gehen wir von einem stabförmigen Körper zu einer dreieckigen, überall gleich dicken, ebenen Platte über, bei der gleichen Flächenstücken gleiche Massen und daher auch gleiche Gewichte entsprechen. Um den „Schwerpunkt des Dreieckes“ ABC (Fig. 22) zu finden, denken wir uns die Platte in Stäbe von durchwegs gleicher Stärke zerlegt, die zur Dreieckseite BC parallel sind. Jeder Stab hat seinen Schwerpunkt in der Mitte, und diese Mittelpunkte bilden wieder eine Gerade AN, die wir als „Schwerlinie“ bezeichnen, weil sie nur aus Schwerpunkten zusammengesetzt ist; da die der Dreieckseite BC näherliegenden Theile die Schwerpunkte längerer Stäbe enthalten, so können wir eine solche Schwerlinie nicht als eine gleichmäßig mit Masse belegte Gerade auffassen, wohl aber muss sie noch den Schwerpunkt aller Massen enthalten, da für irgend zwei Massen der Schwerpunkt immer wieder auf der geraden Verbindungslinie liegt.

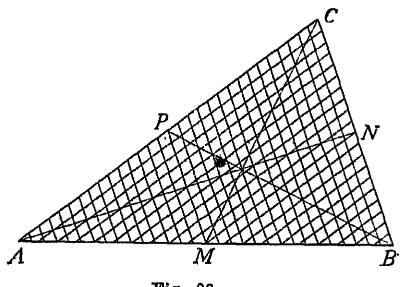


Fig. 22.

Zerlegen wir hierauf das Dreieck in ein System von Stäben, die zur anderen Seite AC parallel sind, so erhalten wir eine zweite Schwerlinie BP, die auch den Schwerpunkt des Dreieckes enthält. Da der Schwerpunkt auf beiden Schwerlinien liegen muss, so kann er nur in ihrem Durchschnittspunkte liegen, der die Schwerlinien im Verhältnis 1 : 2 theilt.

Auf diesem Wege können wir den Schwerpunkt jedes Vieleckes finden, indem wir den Durchschnittspunkt zweier Schwerlinien aufsuchen.

Ziehen wir im Viereck $ABCD$ (Fig. 23) die Diagonale AC, so zerfällt es in zwei Dreiecke, deren Schwerpunkte E und F sind. Die Strecke EF ist also eine Schwerlinie des ganzen Viereckes. Ziehen wir die Diagonale BD und construieren wir die Schwerpunkte der so erhaltenen Dreiecke G und H, so ist auch die Gerade GH eine Schwerlinie und daher ihr Durchschnittspunkt S mit EF der Schwerpunkt des Viereckes.

Ein Fünfeck können wir durch eine Diagonale in ein Dreieck und ein Viereck zerlegen, deren Schwerpunkte miteinander verbunden eine Schwerlinie geben; die zweite Schwerlinie erhalten wir dadurch, dass wir zur Zerlegung des Fünfeckes eine andere Diagonale wählen. In ähnlicher Weise können wir auch bei jedem anderen Polygone verfahren.

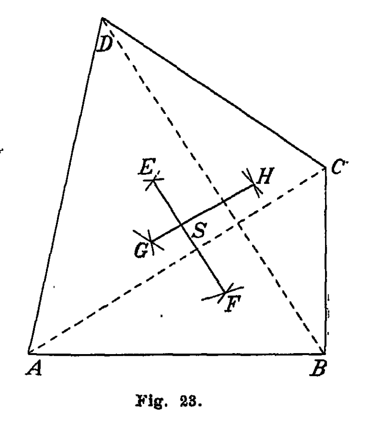


Fig. 23.

Diese Construction lässt sich wesentlich vereinfachen, wenn die Figur eine Symmetrieachse hat, die immer zugleich eine Schwerlinie ist. In regelmäßigen Vielecken ist der Mittelpunkt der Durchschnittspunkt aller Symmetrieachsen und daher auch der Schwerpunkt der ganzen Figur.

Aus demselben Grunde ist der Mittelpunkt einer kreisförmigen Scheibe auch deren Schwerpunkt, und der Schwerpunkt eines concentrischen Kreisringes ist daher dessen Mittelpunkt, obwohl dieser außerhalb des Körpers liegt.

Zum Zwecke der constructiven Bestimmung des Schwerpunktes der von Ebenen begrenzten Körper gehen wir von der dreiseitigen Pyramide aus.

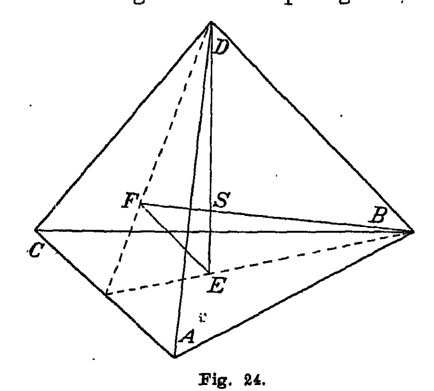


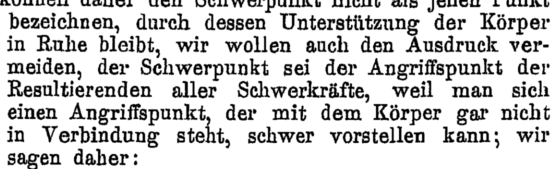
Fig. 24.

Wir denken uns die Pyramide $ABCD$ (Fig. 24) in durchwegs planparallele Platten zerschnitten, welche zur Grundfläche parallel sind. Jede derselben hat ihren eigenen Schwerpunkt, und alle diese Schwerpunkte liegen auf der Geraden ED, welche den untersten Schwerpunkt E mit der gegenüberliegenden Ecke D verbindet.

Nebst dieser Schwerlinie erhalten wir noch eine zweite, indem wir den Schwerpunkt F einer zweiten Seitenfläche mit der gegenüberliegenden Ecke B verbinden, und der Durchschnittspunkt S dieser beiden Schwerlinien ist der Schwerpunkt der ganzen Pyramide. In der Pyramide $ABCD$ verhält sich aber, da FE parallel zu BD ist, $FE : BD = ES : SD = 1 : 3$, mithin ist $ES = {}^1/_4 ED$.

Um den Schwerpunkt eines Polyeders zu finden, das von mehr als 4 Seitenflächen begrenzt ist, zerlegen wir dasselbe in mehrfacher Weise in eine dreiseitige Pyramide und ein anderes Polyeder, und gelangen dadurch immer wieder zu neuen Schwerlinien, die sich insgesammt im Schwerpunkte schneiden.

Auch bei Körpern sind die Symmetrieachsen immer Schwerlinien, weil je zwei symmetrisch gelegene Punkte ihren Schwerpunkt in der Symmetrieachse haben. Die regelmäßigen Körper haben den Schwerpunkt in ihrem Mittelpunkte, weil sich in diesem alle Symmetrieachsen schneiden. Aus demselben Grunde ist auch der Mittelpunkt einer Kugel oder einer Kugelschale deren Schwerpunkt. Jeder kreisförmige Ring hat eine Symmetrieachse und eine darauf senkrecht stehende Symmetrieebene, die von der Achse im Schwerpunkte des Ringes getroffen wird; dieser liegt also außerhalb des ganzen Körpers. Wir können daher den Schwerpunkt nicht als jenen Punkt


bezeichnen, durch dessen Unterstützung der Körper in Ruhe bleibt, wir wollen auch den Ausdruck vermeiden, der Schwerpunkt sei der Angriffspunkt der Resultierenden aller Schwerkräfte, weil man sich einen Angriffspunkt, der mit dem Körper gar nicht in Verbindung steht, schwer vorstellen kann; wir sagen daher:

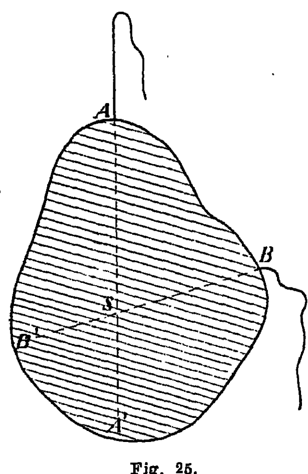


Fig. 25.

„Der Schwerpunkt ist derjenige Punkt, der zugleich mit dem Körper alle Bewegungen ausführt, als wenn die ganze Masse desselben in ihm vereinigt wäre."

Von dieser Definition ausgehend, können wir den Schwerpunkt aller Körper auf experimentellem Wege finden, auch wenn die oben genannten Constructionen zu schwerfällig oder deshalb von vorneherein nicht mehr anwendbar sind, weil oft gleiche Volumstücke nicht gleich viel Masse enthalten.

Wir befestigen an zwei Stellen A und B eines Körpers (Fig. 25) je einen Faden; hängen wir ihn am einen Faden auf, so gibt uns die Verlängerung der Fadenrichtung eine Schwerlinie AA' an, und halten wir den

Körper am anderen Faden, so finden wir die zweite Schwerlinie BB'; der Durchschnittspunkt beider Linien liefert den gesuchten Schwerpunkt. Diese empyrische Auffindung des Schwerpunktes gestattet andererseits auch einen Schluss zu ziehen, wie die Massen in einem nicht homogenen Körper vertheilt sind.

Gleichgewicht und Stabilität.

Hängen wir eine Kugel an einem Faden frei auf, so bleibt sie in einer bestimmten Lage in Ruhe. Verdrängen wir sie durch einen Stoß aus der Ruhelage, so kehrt sie wieder in ihre frühere Ruhelage zurück und kommt hier allmählich zur Ruhe; sie befindet sich also hier im Gleichgewichte. Ein Würfel, den wir auf die horizontale Tischplatte legen, bewegt sich nicht von dieser Stelle. Wenn wir ihn ein wenig um eine horizontale Kante seiner Grundfläche drehen, so kehrt er ebenfalls in seine frühere Stellung zurück, wenn wir ihn auslassen. Geben wir ihm eine etwas stärkere Drehung, bis er um diese Kante umkippt, so kommt er in der neuen Lage wieder zur Ruhe und befindet sich dann im Gleichgewichte.

Kräfte, die sich an einer bestimmten Stelle des Raumes das Gleichgewicht halten, können also an einer anderen Stelle Bewegung hervorrufen. Je nach dem Verhalten der Kräfte in der Umgebung einer Gleichgewichtsstelle können wir die folgenden Arten von Gleichgewicht unterscheiden.

1. Es kann der Fall eintreten, dass ein im Gleichgewichte befindlicher Körper nicht in Bewegung geräth, auch wenn wir eine neue Kraft auf ihn wirken lassen, wie es z. B. bei einem an der Wand befestigten Nagel der Fall ist, an dem wir einen Gegenstand aufhängen. In diesem Falle tritt sofort mit der neuen Kraft auch eine neue Gegenkraft auf, welche der ersteren wieder das Gleichgewicht hält. Die Stellung des Körpers ist fest oder fix.

2. Die auf einen Körper wirkenden Kräfte halten sich nicht nur in seiner Ruhelage, sondern auch rings in der Umgebung das Gleichgewicht. In diesem Falle bleibt jede Bewegung nach dem Principe der Trägheit ununterbrochen erhalten, so weit diese Gleichgewichtsverhältnisse bestehen. Dies trifft zu, wenn eine Kugel über eine glatte, horizontale Ebene rollt, wobei sich das Gewicht und der Gegendruck der Unterlage überall das Gleichgewicht halten. Die Kugel befindet sich dann im indifferenten Gleichgewichte.

3. Die Kräfte, welche auf einen im Gleichgewichte befindlichen Körper wirken, heben sich außerhalb der Ruhelage nicht auf, aber in der neuen Lage ergeben sie eine Resultierende, welche den Körper gegen die ursprüngliche Ruhelage zurückbewegt. Bringen wir die an einem Faden hängende Kugel (Fig. 26) von ihrer Ruhelage R nach A, so heben sich die Zugkraft und die in ihre Richtung fallende Componente AB der Schwerkraft AA' gegenseitig auf, während die andere Componente AC in der Richtung der Tangente die Kugel gegen die Ruhelage zu bebewegen sucht. Die Kugel befindet sich im stabilen Gleichgewicht.

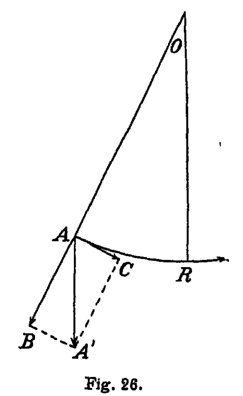


Fig. 26.

4. Die Verdrängung des Körpers aus seiner Ruhelage führt denselben in ein Gebiet, wo die Kräfte eine Resultierende ergeben, die ihn von seiner

ursprünglichen Ruhelage entfernt. Legen wir z. B. eine Kugel (Fig. 27) auf die höchste Stelle einer gewölbten Fläche, so befindet sie sich an dieser Stelle O im Gleichgewicht. Sobald sie aber von dieser Stelle nach A verdrängt wird, kommt gegenüber dem Gegendruck der Unterlage sofort eine Componente AC der Schwerkraft AA' zur Geltung, welche die Kugel immer weiter von der Gleichgewichtslage entfernt. Die Gleichgewichtslage in O ist dann eine labile, weil die geringste Verschiebung den Körper veranlasst, aus einer solchen Gleichgewichtslage wegzugleiten.

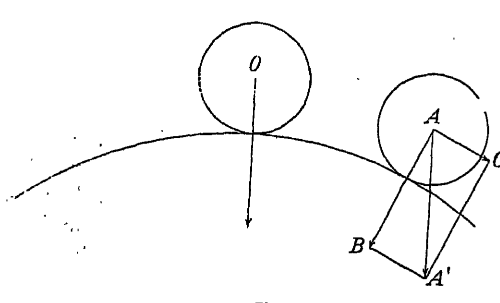


Fig. 27.

Befindet sich ein Körper in der stabilen Gleichgewichtslage, so muss die ihn aus derselben verdrängende Kraft eine Arbeit leisten. Wollen wir z. B. den Körper (Fig. 28) um die Kante A drehen, so müssen wir dem Drehmomente $mg \cdot AP$ des Schwerpunktes S bezüglich einer Achse um A ein ebenso großes Drehmoment entgegensetzen, und für dasselbe muss daher die Gleichung bestehen:

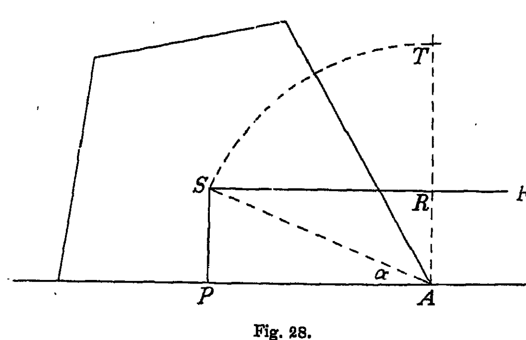


Fig. 28.

$$F \cdot AR = F \cdot PS = mg \cdot AP.$$

Die Kraft $F = mg \frac{AP}{PS} = \frac{mg}{tg \alpha}$ ist das Maß für die „Standfestigkeit" des Körpers. Diese ist um so größer, je kleiner der Winkel α ist, und ist proportional dem Gewichte. Die Arbeit, welche nöthig ist, um den Körper vollständig zum Umkippen zu bringen, ist hier gleich $mg \cdot RT = mg \cdot (1 - \sin \alpha) \cdot AS$.

Die einfachen Maschinen.

Die Maßzahl der Arbeit hängt einerseits von der Länge des zurückgelegten Weges und andererseits von der Größe der Kraft ab. Haben Kraft und Weg verschiedene Richtungen, so kommt für die zu leistende Arbeit nur die in die Richtung des Weges entfallende Kraftcomponente oder die in die Richtung der Kraft entfallende Bewegungscomponente in Betracht. Soll z. B. (Fig. 29) ein Körper mit dem Gewichte $p = mg$ längs einer schiefen Ebene von der Länge $AB = l$ hinaufgeschoben werden, so ist die zu leistende Arbeit $L = l\,mg \cdot \sin \alpha$, da in die Richtung AB nur die Componente der Schwerkraft $PM = mg \cdot \sin \alpha$ entfällt.

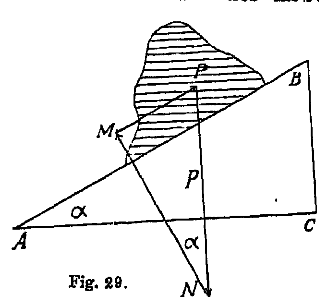


Fig. 29.

Wenn wir dagegen die Bewegung von A nach B in die horizontale Bewegung AC und in die verticale CB zerlegen, so entfällt in die erstere Richtung keine, in die letztere Richtung aber die ganze Schwerkraft, und daher ist die dabei geleistete Arbeit wieder $L = l \sin \alpha \,.\, mg$, weil $BC = l \,.\, \sin \alpha$ der zurückgelegte Weg und mg die zur Hebung nöthige Kraft ist.

Bei allen Maschinen handelt es sich darum, den einen oder den anderen der für die Arbeit maßgebenden Factoren, also die Kraft oder Wegrichtung, in einer dem Zwecke derselben entsprechenden Weise abzuändern Man kann daher nicht nur in Bezug auf die einfachen, sondern für alle Maschinen den Satz aufstellen:

Maschinen sind Vorrichtungen, welche dazu dienen, die Größe und Richtung einer Kraft oder die Bewegung ihres Angriffspunktes so zu verändern, wie es für eine bestimmte Arbeitsleistung besonders günstig ist.

Da jede Bewegungsart dem unvermeidlichen Widerstande des Mittels und der Reibung begegnet, so kommen bei allen Arbeitsleistungen durch eine Maschine zwei im entgegengesetzten Sinne wirkende Kräfte zur Geltung.

Diejenige Kraft, welche eine dem Zwecke der Maschine entsprechende Bewegung herbeizuführen berufen ist, bezeichnen wir als „Kraft“ schlechtweg, die ihr Widerstand leistenden Kräfte dagegen als „Last“. Stehen Kraft und Last zueinander in einem solchen Verhältnis, dass keine Bewegung eintritt, so halten sie sich gegenseitig das Gleichgewicht. Um zu erfahren, welches Maß von Kraft aufgewendet werden muss, um mittels einer Maschine eine bestimmte Arbeit zu leisten, müssen wir zunächst die Gleichgewichtsbedingung kennen lernen.

Als „einfache“ Maschinen bezeichnet man folgende Vorrichtungen, die ihrer Natur nach eine weitere Vereinfachung nicht zulassen und auf welche sich alle anderen Maschinen als Combinationen derselben zurückführen lassen.

I. Der Hebel. Unter einem Hebel versteht man eine gerade oder winkelförmig gekrümmte Stange, welche zwischen dem Angriffspunkte der Kraft, dem der Last und dem Unterstützungspunkte eine hinreichend feste Verbindung herstellt.

Das Stück zwischen dem Unterstützungspunkt und dem Angriffspunkt der Kraft nennt man „Kraftarm“ und den Theil zwischen dem Unterstützungspunkt und dem Angriffspunkt der Last den „Lastarm“. Liegen diese beiden Theile auf verschiedenen Seiten des Unterstützungspunktes, so ist der Hebel ein „zweiarmiger“, anderenfalls ein „einarmiger“.

Damit beim einarmigen Hebel (Fig. 30) Gleichgewicht herrsche, müssen die Drehmomente für Kraft und Last gleich sein, also muss $mq = np$, ferner besteht für die Angriffspunkte von Kraft und Last die Gleichung $m : n = m' : n'$, weshalb

$$\frac{p}{q} = \frac{m}{n} = \frac{m'}{n'},$$

d. h. Kraft und Last verhalten sich wie Last- und Kraftarm oder wie die von den Angriffspunkten der Last und Kraft zurückgelegten Wege. Letztere kommen nur insoferne in Betracht, als ihr Größenverhältnis zur Feststellung

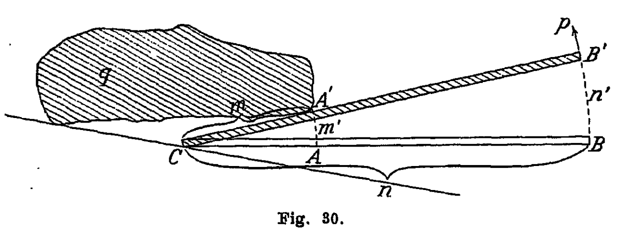


Fig. 30.

der Gleichgewichtsbedingung dient; man bezeichnet sie daher als virtuelle Verschiebungen, da wirkliche Verschiebungen beim Gleichgewichte ausgeschlossen sind.

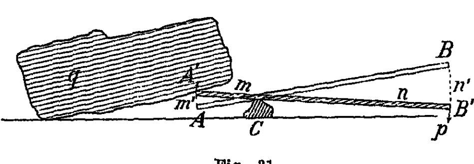


Fig. 31.

Auf ähnlichem Wege kann man beim zweiarmigen Hebel (Fig. 31) die Gleichgewichtsbedingung ermitteln. Auch in diesem Falle bestehen die Gleichungen: $\frac{p}{q} = \frac{m}{n} = \frac{m'}{n'}$. Dabei ist es von Wichtigkeit, auch die auf den Unterstützungspunkt ausgeübte Kraft in Rechnung zu ziehen und darauf zu achten, dass derselbe dem Angriffe der Kräfte hinreichenden Widerstand zu leisten vermag.

Die Ermittelung der Gleichgewichtsbedingung durch Vergleichung der den virtuellen Verschiebungen entsprechenden Arbeitsleistungen ist auf d'Alembert (1743) zurückzuführen.

2 **Die Rolle** besteht aus einer kreisförmigen Scheibe und trägt an ihrem Umfange eine rinnenförmige Vertiefung (Nut), welche zur Aufnahme des über die Rolle laufenden Seiles dient. Die Achse der Rolle bewegt sich in den Lagern der „Schere", die entweder an einem Balken befestigt ist oder auch als Angriffspunkt einer Last verwendet werden kann. Im ersten Falle spricht man von einer „fixen", im letzteren von einer „beweglichen" Rolle.

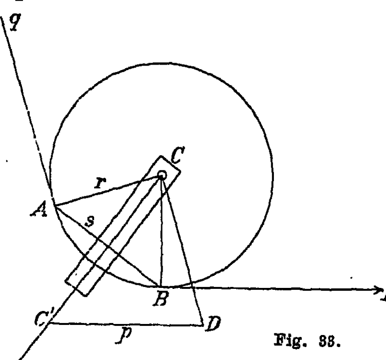


Fig. 33.

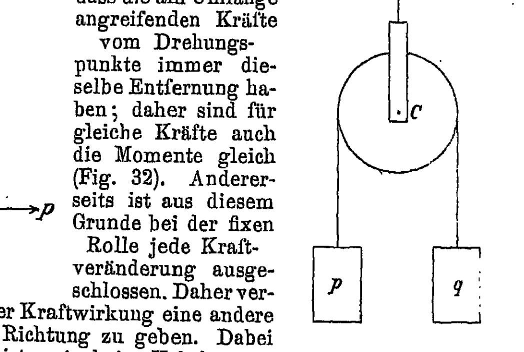


Fig. 32.

Die kreisförmige Gestalt der Rolle bringt es mit sich, dass die am Umfange angreifenden Kräfte vom Drehungspunkte immer dieselbe Entfernung haben; daher sind für gleiche Kräfte auch die Momente gleich (Fig. 32). Andererseits ist aus diesem Grunde bei der fixen Rolle jede Kraftveränderung ausgeschlossen. Daher verwendet man sie auch nur, um einer Kraftwirkung eine andere Richtung zu geben. Dabei ist, wie beim Hebel, auch die Festigkeit des Achsenlagers zu berücksichtigen, und zwar muss dasselbe, wenn die Kraftrichtungen parallel sind, mehr als der doppelten Kraft das Gleichgewicht halten können. Schließen die beiden Kraftrichtungen miteinander einen hohlen Winkel ein, so erfährt das Achsenlager einen Zug, welcher der Resultierenden aus Kraft und Last gleich ist (Fig. 33). $C'D$, DC und CC' seien die Vectoren der 3 Kräfte, welche sich das Gleichgewicht halten sollen. Aus der Ähnlichkeit $C'DC \sim ACB$ folgt $C'C : C'D = AB : AC$ und daher $C'C : p = s : r$. Daher erfährt die Rolle einen Zug $CC' = Q = \frac{s}{r} p$.

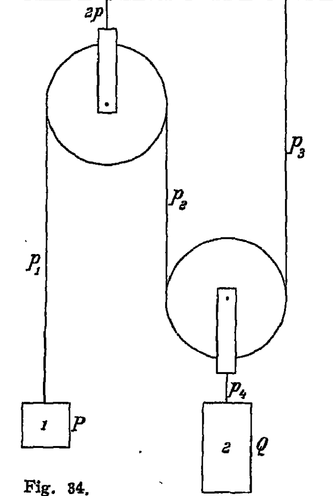


Fig. 34.

Wenn p und q parallel sind, so ist $s = 2r$ und daher $Q = 2p$.

Bei einer beweglichen Rolle (Fig. 34), an deren Schere das Gewicht p_4 hängt, besteht also Gleichgewicht, wenn $p_1 = p_2 = p_3 = \frac{p_4}{2}$, da alle Kräfte in derselben Richtung wirken.

Wird der Angriffspunkt P der Kraft p_1 um 2 dm verschoben, so wird die Seilschlinge nur um 1 dm kürzer, weil sich die Verkürzung auf beide Hälften vertheilt, und die Last Q wird daher nur um 1 dm gehoben. Während also die Kraft p_1 der Last p_4 das Gleichgewicht hält, muss bei einer virtuellen Verschiebung ihr Angriffspunkt den doppelten Weg zurücklegen, um die Last Q um eine gewisse Strecke zu heben.

Wenn wir also bei der Beurtheilung des Kraftverhältnisses von der Voraussetzung ausgehen, dass der Arbeitsbetrag für die Last so groß sein muss, wie für die Kraft, so müssen wir hier sagen: weil der Weg des Angriffspunktes der Kraft P doppelt so groß ist, als der der Last, so vermag sie einer doppelt so großen Last das Gleichgewicht zu halten. Diesen Schluss, dass die zurückgelegten Wegstrecken zu den sich das Gleichgewicht haltenden Kräften im verkehrten Verhältnis stehen müssen, um gleiche Arbeit zu leisten, nennt man die goldene Regel der Mechanik, denn sie lässt sich selbst dann anwenden, wenn man die innere Construction einer Maschine gar nicht kennt.

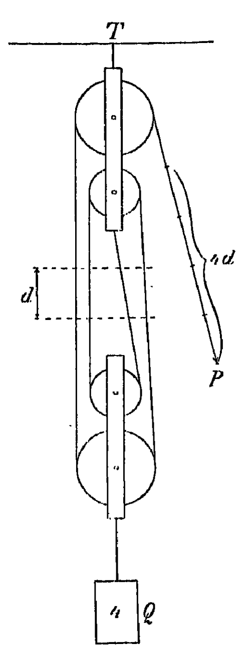


Fig. 35.

Unter einem Flaschenzug versteht man eine Combination von festen und beweglichen Rollen, bei der sowohl erstere wie auch letztere in einer gemeinsamen Scheere, der Flasche, über- oder auch nebeneinander angebracht sind. Zwei solche Flaschen werden nun in der Weise durch ein Seil miteinander verbunden, wie es die Fig. 35 zeigt.

Wird nun durch einen Zug am freien Ende des Seiles die Entfernung der Flaschen um ein Stück d verkürzt, so muss der Punkt P um $l = 4d$ herausgezogen werden, falls sich in jeder Flasche zwei Rollen befinden. Wenden wir nun auf das so gefundene Verhältnis der von Kraft und Last zurückgelegten Wege die goldene Regel der Mechanik an, so folgt, dass sich Kraft und Last wie $1:4$ verhalten müssen. Zu der mit der Hebung der Last verbundenen Arbeit kommt dann noch diejenige, welche zur Überwindung der Reibung nöthig ist.

3. Das Wellrad (Fig. 36) stimmt mit der fixen Rolle darin überein, dass die Kraft mit Hilfe eines Seiles an der Peripherie eines Kreises angreift und in Bezug auf dessen Achse ein von der Stellung des Rades unabhängiges Moment erzeugt. Ein wesentlicher Unterschied besteht dagegen darin, dass Kraft und Last nicht am Umfang desselben Kreises angreifen. Das Seil, welches die Last trägt, wird ferner auf einer Walze aufgewickelt, während es sich bei der Rolle nur um einen Theil der Peripherie herumlegt. Damit Gleichgewicht herrsche, müssen die an den Umfängen der beiden Kreise angreifenden Kräfte sich verkehrt wie deren Halbmesser verhalten, weil dann die Momente gleich sind.

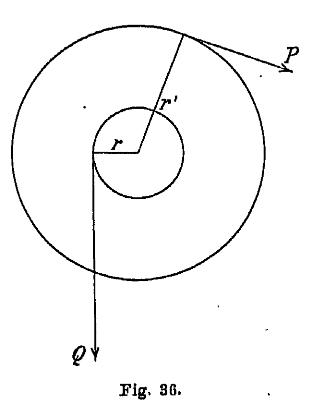


Fig. 36.

Diesem Kraftersparnis steht aber der größere Weg gegenüber, den der Angriffspunkt der Kraft zurücklegen muss, und damit auch ein entsprechender Zeitverlust.

Um sehr große Lasten mit geringem Kraftaufwande zu heben, bedient man sich auch folgender Vorrichtung. (Fig. 37.) Zwei Walzen, deren Halbmesser nur wenig verschieden sind, drehen sich um die eine gemeinsame Achse, welche außerdem noch mit einem größeren Hebelarme r_3 in Verbindung steht. Das Seil ist in der Weise um die beiden Walzen gewickelt, dass sich dasselbe auf der einen Walze aufwickelt, während es sich von der anderen abwickelt. Sind also r_1 und r_2 die Halbmesser der Walzen, so wird die an der Seilschlinge hängende Last bei jeder Umdrehung, wie bei der beweglichen Rolle, um die Hälfte von $2\pi(r_2 - r_1)$ gehoben, während der Endpunkt des Hebelarmes einen Weg beschreibt, welcher gleich $2\pi r_3$ ist. Wenden wir nun die goldene Regel der Mechanik an, der zufolge $\pi(r_2 - r_1) Q = 2\pi r_3 P$, dann ergibt sich $P = \frac{r_2 - r_1}{2 r_3} Q$, das heißt, die zur Hebung der Last nöthige Kraft beträgt also nur $\frac{r_2 - r_1}{2 r_3}$ von der Last. Ist z. B. $r_2 = 20$ cm, $r_1 = 15$ cm und $r_3 = 500$ cm, so erhalten wir

$$P = \frac{5}{2 \times 500} Q = \frac{1}{200} Q$$

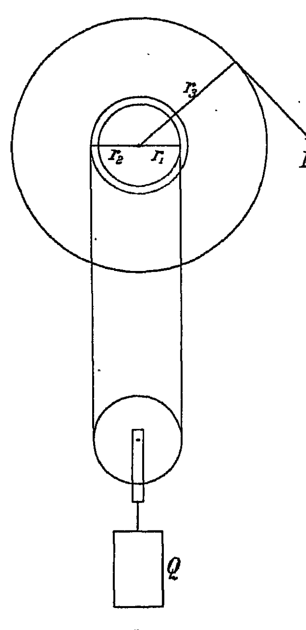


Fig. 37.

Ganz ähnlich, wie beim Wellrade, verhält sich das Gleichgewicht bei Zahnradcombinationen. Auch hier drehen sich immer zwei Zahnräder mit verschiedenem Radius um eine gemeinsame Achse und dem Verhältnisse der Halbmesser entspricht das Verhältnis der am Umfange der Räder angreifenden Kräfte. Das Verhältnis der sich entsprechenden Wege hat wieder den reciproken Wert, wie das Verhältnis von Kraft und Last, nur muss gleichzeitig auch eine bedeutende Reibung überwunden werden, die allerdings bei einem großen Kraftersparnisse kaum von Belang ist. Wird zum Kraftantrieb einer der schnellgehenden Motoren verwendet, wie sie jetzt immer mehr in Gebrauch kommen, so ist auch der mit einem großen Kraftersparnis verbundene Zeitaufwand weniger empfindlich.

4. Die schiefe Ebene als Maschine. Wirkt, wie es in Fig. 38 der Fall ist, eine Kraft parallel zur Länge $l = AB$ der schiefen Ebene, dann besteht Gleichgewicht zwischen dieser Kraft LM, dem Widerstande der schiefen Ebene NL und der Schwerkraft MN, wenn die Vectoren dieser drei Kräfte das Dreieck LMN bilden. Die Kraft $p = LM$ hält also mit Hilfe des Widerstandes der Ebene der Schwerkraft das Gleichgewicht, wenn sie sich zur Last $q = NM$ verhält, wie die Höhe $h = BC$ der schiefen Ebene zu deren Länge l, denn das Kräftepolygon MNL ist dem Dreieck BAC ähnlich und daraus ergibt sich die Proportion

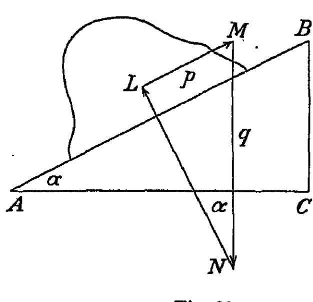


Fig. 38.

$$LM : MN = CB : BA \text{ oder } p : q = h : l \text{ und } p = \frac{h}{l} q = q \sin \alpha.$$

Das Kraftverhältnis ist daher desto günstiger, je kleiner der Neigungswinkel α ist; es ist aber nicht diesem, sondern dem Sinus dieses Winkels proportional. Die schiefe Ebene muss dagegen eine Tragfähigkeit besitzen, welche der anderen Componente $q \cos \alpha$ das Gleichgewicht zu halten vermag.

Wirkt die Kraft $MN = p$ (Fig. 39) in horizontaler Richtung, so setzt sie sich mit dem Widerstand NL der schiefen Ebene zur Resultierenden ML zusammen, welche der Schwerkraft LM des Körpers das Gleichgewicht hält. Wegen der Ähnlichkeit
$MNL \sim CBA$ erhalten wir die Proportion $MN : ML = CB : CA$ oder für $AC = b$

$$p : q = h : b; \quad \text{daher ist } p = \frac{h}{b} q = q \operatorname{tang} \alpha$$

In beiden Fällen kommt aber zur Hebung der Last nur noch die Arbeitsleistung bei der Überwindung der Reibung hinzu. Auch dann, wenn ein Körper über eine ebene Fläche hinweggezogen wird, bedarf es hiezu einer Arbeitsleistung, weil die sich reibenden Flächen wie Zahnräder ineinandergreifen. Beim Fortrollen eines Rades werden nun die kleinen Vorsprünge aus den Unebenheiten der Bahn hervorgehoben, während sie bei der gleitenden Verschiebung theilweise weggerissen werden.

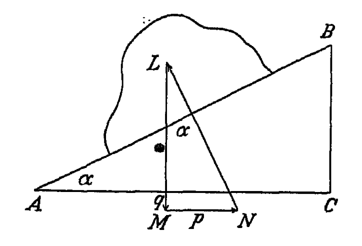


Fig. 39.

Daher ist die „rollende" Reibung viel geringer als die „gleitende". Um nun die Reibung zu „messen", vergleicht man die Kraft, welche nöthig ist, um einen Körper auf horizontaler Oberfläche fortzubewegen, mit dem Gewichte des Körpers.

Den Quotient aus der Kraft, welche zur Überwindung der Reibung eben hinreicht, und dem Körpergewicht bezeichnet man als den **Reibungscoefficient.**

Dieser lässt sich bestimmen, indem man den Körper auf eine schiefe Ebene legt und derselben eine solche Neigung gibt, dass er längs derselben herabgleitend eine gleichförmige Geschwindigkeit annimmt. Dann ist die ihn verschiebende Schwerkraftscomponente gleich $q \sin \alpha$, während der Druck auf die schiefe Ebene gleich ist $q \cos \alpha$. Das Verhältnis dieser beiden Kräfte ist aber $q \sin \alpha : q \cos \alpha = \operatorname{tg} \alpha$, also ist dann die Tangente des Neigungswinkels zugleich auch der Reibungscoefficient.

Der Reibungscoefficient für die rollende Bewegung auf Eisenbahnstahlschienen ist etwa $^1/_{200} = 0{\cdot}005$, bei Trambahnschienen $^1/_{100} = 0{\cdot}01$, auf dem Straßenpflaster von $\frac{1}{50} - \frac{1}{30}$; für gleitende Reibung zwischen Eisen und Eisen ist er 0·11, zwischen Lederriemen und Gußeisen 0·27; zwischen Lederriemen und Eichenholz ist er während des Gleitens 0·27, in Ruhe aber 0·47, also nahezu die Hälfte des Druckes.

Während also im einen Falle die Reibung ein Bewegungshindernis bildet, indem sie einen namhaften Theil der aufgewendeten Arbeit ihrem eigentlichen Zwecke entzieht, können wir dieselbe bei anderer Gelegenheit benützen, um z. B. eine Riemenscheibe durch eine andere in Bewegung zu versetzen.

Außerdem lehrt die Erfahrung, dass die Reibung dem auf der Fläche lastenden Drucke proportional, dagegen innerhalb gewisser Grenzen von der Ausdehnung der sich berührenden Flächen fast unabhängig ist. Bei sich fortwährend reibenden Maschinentheilen ist es daher besser, breite Flächen anzuwenden, weil dann die Abnützung eine viel geringere ist, ohne dass deshalb die Reibung wesentlich zunimmt.

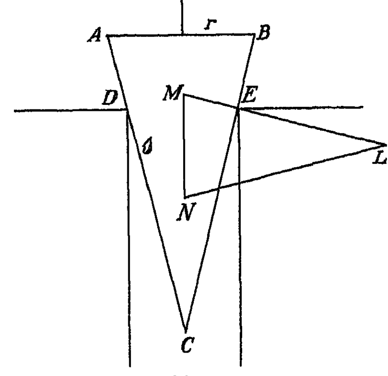


Fig. 40.

5. Der Keil. (Fig. 40.) Der Querschnitt des Keiles hat die Gestalt eines gleichschenkligen Dreieckes; der Rücken bildet die Grundlinie und die Schenkel entsprechen den Seiten.

Wird auf den Rücken des Keiles in der Richtung der Symmetrielinie eine Kraft ausgeübt, so übt der Körper senkrecht gegen die Seiten desselben einen Druck aus. Dieser hält der Kraft des eindringenden Keiles eben das Gleichgewicht, wenn die Vectoren ML, LN und MN ein geschlossenes Polygon, in unserem Falle also das Dreieck MNL bilden; dieses ist dem Querschnitte ABC ähnlich und daher besteht die Proportion

$$MN : ML = AB : BC \text{ oder } p : q = r : s \text{ und } p = \frac{r}{s} q.$$

6. Die Schraube. Ihre Erfindung wird auf den bekanntesten Mathematiker des Alterthums, auf Archimedes aus Syracus, im dritten Jahrhundert vor Christi Geburt, zurückgeführt. Sie ist nicht nur für die constructive Mechanik, sondern auch für die Messtechnik nebst dem Hebel die wichtigste und gebräuchlichste Maschine. Sie verknüpft in der denkbar einfachsten Weise die progressive Bewegung in der Richtung der Achse mit der drehenden Bewegung um dieselbe. Wir erhalten die Schraubenlinie, wenn sich auf der Mantelfläche eines um die Achse rotierenden Kreiscylinders ein Punkt parallel zur Achse mit gleichförmiger Geschwindigkeit fortbewegt. Es gibt zwei verschiedene Formen der Schrauben. In Fig. 41 sehen wir links eine rechtswendige und rechts eine linkswendige Schraubenlinie. Erstere sind weitaus die gebräuchlichsten.

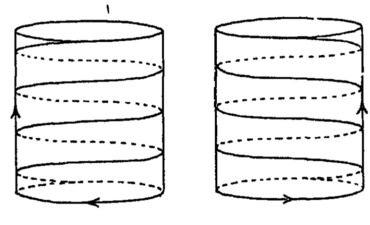


Fig. 41.

Je nachdem das Gewinde die Gestalt wie in Fig. 42 a oder b hat, bezeichnet man dasselbe als ein scharfes oder flaches, und als Schraubenspindel oder als Schraubenmutter, je nachdem das Gewinde auf einem massiven Cylinder oder in einem Hohlcylinder eingeschnitten ist. Schraubenspindel und Schraubenmutter bilden zusammen einen Schraubensatz. Der den Umfang nur einmal umspannende Theil des Gewindes heißt eine Windung, die Entfernung zweier benachbarter Windungen bildet die Höhe eines Schraubenganges.

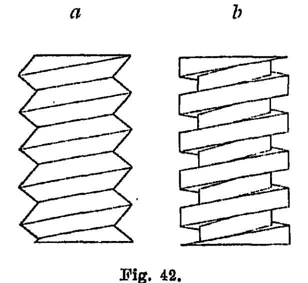


Fig. 42.

Die Schraube wird in der Weise verwendet, dass eine Kraft in der Entfernung r (Fig. 43) von der Achse angreift und so die Spindel in der Richtung der Achse verschiebt. Die Schraubenlinie erhalten wir aber auch, wenn das Dreieck, welches wir zur Darstellung der schiefen Ebene verwendet haben, auf der Mantelfläche des Cylinders so aufgerollt wird, dass die Höhe zur Achse parallel ist und die Grundlinie die Peripherie bildet. Die Kraft wirkt parallel zur Grundlinie der schiefen Ebene an der Peripherie, die Last in der Richtung der Achse.

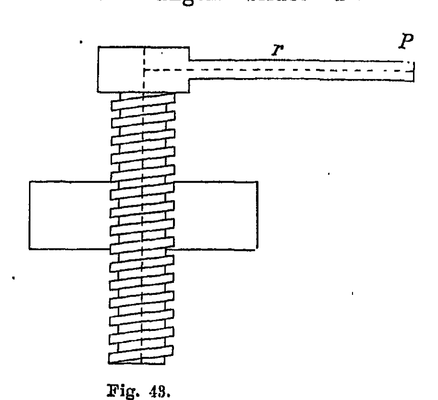


Fig. 43.

In diesem Falle herrscht bei der schiefen Ebene und daher auch bei der Schraube Gleichgewicht, wenn sich die Kraft zur Last, wie die Höhe eines Schraubenganges zu ihrem Umfang verhält. Greift nun eine Kraft p am Endpunkt P eines Hebelarmes von der Länge r senkrecht zu diesem an, so beschreibt dieser eine Schraubenlinie mit derselben Ganghöhe, wie ihn die Schraube besitzt. Für diese Schraubenlinie besteht dann Gleichgewicht, wenn $p = \frac{h}{2r\pi} \cdot q$ Die Kraft verhält sich also zur Last, wie die Höhe eines Schraubenganges zum Umfange des Kreises, den der Angriffspunkt der Kraft beschreibt. Wie groß der Querschnitt der Spindel oder wie tief das Gewinde in dieselbe eingeschnitten ist, hat für Wirkung der Schraube keine weitere Bedeutung und wird lediglich im Interesse der Festigkeit mehr oder weniger stark bemessen.

Die Reibung ist bei der Schraube infolge des zwischen den Gewindeflächen herrschenden großen Druckes meist eine sehr große, und gerade diese große Reibung benützt man beim „Festschrauben", um zunächst eine Drehung der Spindel um ihre Achse und daher noch mehr eine solche längs der Achse zu verhindern.

Die Bedeutung der Schraube für die Messtechnik ergibt sich aus ihrer Anwendung als Mikrometerschraube.

Die Wage.

1. Die Federwage. Zur Bestimmung geringerer Gewichte verwendet man vielfach die Federwage, bei welcher die den verschiedenen Gewichten entsprechenden Verschiebungen durch Aichung festgestellt werden, indem man z. B. 1, 2, 3 ... g auf die Wagschale legt und dann die betreffenden Zeigerstellen auf der Scala notiert.

Der Vorzug der Federwagen besteht zunächst darin, dass man zur Wägung keiner Gewichte bedarf und daher die Wägung sehr rasch vollzogen ist. Ein anderer Vorzug, principieller Bedeutung, ist ferner der, dass dabei ein Gewicht der Federkraft das Gleichgewicht hält, und nicht, wie bei allen anderen Wagen, ein Gewicht mit einem anderen Gewicht verglichen wird.

Wenn wir uns mit irgend einer der noch zu besprechenden Wagen sehr weit von der Oberfläche der Erde entfernen könnten, um dort eine Wägung vorzunehmen, so würden wir nie eine Veränderung der Schwerkraft zu constatieren vermögen, wohl aber würde uns die Federwage sagen, dass die Intensität der Schwerkraft abnimmt, obwohl die Masse der Gewichte dieselbe bleibt. Sie hat ferner den Vorzug, dass man auch die Größe einer Kraft messen kann, die nicht gerade in verticaler Richtung wirkt. Dagegen hat sie den Nachtheil, dass ihre Angaben relativ ungenau sind und sich bei fortgesetztem starken Gebrauch ändern. Als eine Abart der Federwage können die verschiedenen Dynamometer angesehen werden, welche eine Zug- oder Druckkraft in kg angeben.

Fig. 44.

2. Die Zeigerwage. (Fig. 44). Der wesentlichste Bestandtheil derselben ist ein um den Punkt O drehbarer Winkelhebel AOM. Am Ende des horizontalen Hebelarmes ist eine Stange befestigt, welche die Schale trägt; damit dieselbe immer in horizontaler Lage bleibt, ist ein zweiter Punkt D der Stange mit dem Stativ biegsam verbunden.

Das ganze bewegliche Hebelsystem habe seinen Schwerpunkt in S und dieser wird durch die Belastung nach S' verschoben. Hat sich nun beim Ausschlagswinkel α Gleich-

gewicht eingestellt, so ist, wenn p das Gewicht des Hebelsystems und q das der Last bedeutet, $p \cdot S' S'' = p \cdot SO \sin\alpha = q \cdot A' A'' = q \cdot OA \cos\alpha$

mithin $q = p \frac{SO}{OA} \operatorname{tg} \alpha$. Der Ausdruck $p \cdot \frac{SO}{SA}$ hat bei derselben Wage einen unveränderlichen Wert, also ist die Last q der Tangente des Ausschlagswinkels proportional.

Auch diese Wage bietet also den Vortheil, dass man zum Wägen keiner Gewichte bedarf; aber eine Veränderung der Schwerkraft vermöchte sie nicht anzugeben.

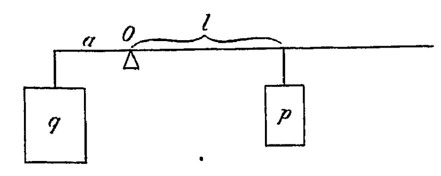


Fig. 45.

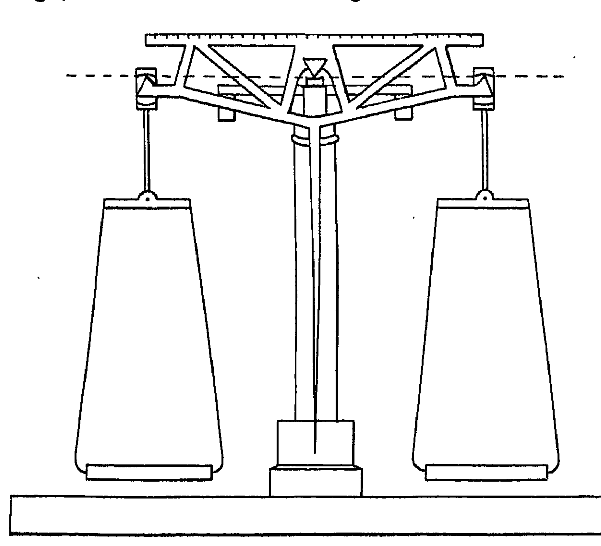
3. Die römische Schnellwage ist ein zweiarmiger Hebel (Fig. 45). Am einen Ende desselben greift die Last q an. Die unbelastete Wage befindet sich im Gleichgewicht, wenn man im Punkte O das sogenannte Laufgewicht p aufhängt. Wenn nun am kürzeren Hebelarm eine Last q hängt, so muss das von ihr erzeugte Drehmoment dadurch aufgehoben werden, dass man das Laufgewicht vom Drehungspunkt weg solange verschiebt, bis sich der Hebel horizontal stellt. Ist l die so gefundene Entfernung, dann besteht die Gleichung

$$q\,a = p\,l, \text{ und daher ist } q = \frac{p}{a} \cdot l$$

Da sich nun p und a nicht ändern, solange wir dasselbe Laufgewicht und dieselbe Wage verwenden, so ist die Last q der Länge l proportional; bei solchen Wagen findet man auf dem längeren Hebelarme die Theilstriche bereits so eingraviert, dass sie gleich die entsprechenden Gewichtseinheiten angeben.

Auch diese Wage verdankt ihre weite Verbreitung dem Umstande, dass man zum Wägen ein einziges Gewicht benöthiget und mit Hilfe desselben ziemlich große Lasten rasch wägen kann.

4. Die weitaus bekannteste Form einer Wage ist die **gleicharmige Wage**, welche als **Krämerwage** den Bedürfnissen des praktischen Lebens entspricht. In einem viel höheren Maße als bei dieser stellt man dagegen an die wissenschaftliche oder **Präcisionswage** (Fig. 46) die Forderung, dass dieselbe empfindlich, stabil und richtig sei.


Fig. 46.

Der Wagebalken besitzt drei in einer Geraden liegende parallele Kanten; auf der mittleren ruht der Wagebalken, und auf den beiden äußeren werden die Wagschalen eingehängt. Um die mittlere Kante vor allzurascher Abnützung zu schützen, wird der Wagebalken durch die Arretierungsvorrichtung aus dem Achsenlager gehoben, wenn die Wage nicht in Gebrauch ist.

Dem Wagebalken gibt man, um ihn hinreichend tragfähig zu machen, die in der Figur angegebene Gestalt oder ähnliche Formen; der Schwerpunkt S muss unterhalb des Unterstützungspunktes fallen, damit sich der Wagebalken im stabilen Gleichgewichte befindet und eine horizontale Stellung annimmt, wenn er nicht belastet ist. Wird die eine oder die andere Wagschale etwas stärker belastet, dass der Wagebalken auf der betreffenden Seite sich neigt, so stellt sich dem Drehmoment des Übergewichtes das Drehmoment des Schwerpunktes S entgegen. Der Ausschlag der mit dem Wagebalken verbundenen Zunge ist also wie bei der Zeigerwage ein Maß für die Größe des Übergewichtes.

Ist α der Ausschlagswinkel beim Übergewichte p (Fig. 47), l die Länge der Arme und g das Gewicht des Wagebalkens, so ist $p \cdot l \cos \alpha = g\, d \sin \alpha$ und $\tan \alpha = pl/gd$. Die Tangente des Ausschlagswinkels ist also proportional dem Übergewichte p und verkehrt proportional dem Abstand d des Schwerpunktes S vom Drehungspunkte O. Wenn wir also von den aufgelegten Gewichten eines wegnehmen und es vermindert sich dadurch der ohnehin kleine Ausschlagswinkel α ungefähr um die Hälfte, so wird derselbe offenbar ganz verschwinden, wenn wir noch einmal so viel wegnehmen.

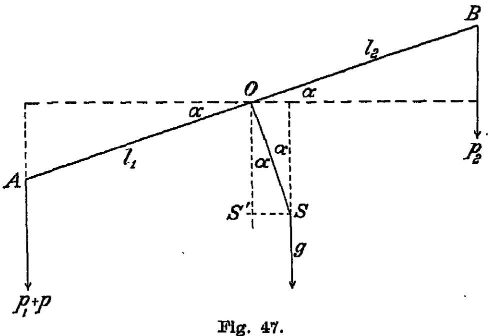


Fig. 47.

Die Wage ist empfindlich, wenn sie schon bei einem geringen Übergewicht einen merklichen Ausschlag gibt.

Die Distanz d allzuklein zu nehmen wäre unzweckmäßig, weil dann schon bei kleinen Übergewichten der Ausschlagswinkel zu groß würde.

Die Empfindlichkeit scheint nun noch der Länge der Wagebalken direct proportional zu sein, und auf dieser Ansicht beruht die Construction älterer Wagen mit unverhältnismäßig langen Wagebalken. Damit wird aber auch das Gewicht g des Wagebalkens wesentlich erhöht und dadurch die Empfindlichkeit wieder vermindert. Man trachtet daher vielmehr den Quotienten l/g in der Weise möglichst zu vergrößern, dass man das Gewicht des Wagebalkens möglichst klein macht; eine geringere Länge der Wagebalken ist aber auch vom Standpunkt der Festigkeit sehr wünschenswert.

Von relativ geringerer Bedeutung ist bei der Präcisionswage die „Richtigkeit" derselben, weil man auch mit einer unrichtigen Wage richtig wägen kann.

Richtig ist eine Wage dann, wenn der Wagebalken ohne Wagschalen in horizontaler Lage verbleibt und auch bei Vertauschung der unbelasteten Schalen dieselbe Stellung einnimmt. Diese Eigenschaft ist natürlich besonders dann von Wichtigkeit, wenn man sich, wie es bei der Krämerwage in der Regel vorkommt, mit einer einzigen Wägung begnügt, um das Gewicht eines Körpers zu ermitteln.

Eine Wage kann unrichtig sein, weil die Schalen nicht genau in derselben Entfernung vom Drehungspunkte des Wagebalkens aufgehängt werden. Dieser Fehler lässt sich unschädlich machen, dass man sich der Gauß'schen Wägungsmethode bedient. Nach dieser Methode legt man den zu wägenden Körper zuerst auf die eine Wagschale A und die Gewichte auf die Schale B und wiederholt dann die Wägung, indem man den Körper auf die Wagschale B und die Gewichte auf A gibt. Ist P das wahre Gewicht des Körpers und P_1 der Betrag der Gewichte, der sich ergibt, wenn der Körper auf dem Wagebalken l_1 gewogen wird, und P_2, wenn er auf der anderen Seite gewogen wird, so bestehen für die Momente die Gleichungen

$$P\, l_1 = P_1\, l_2 \text{ und } P\, l_2 = P_2\, l_1$$

Durch Multiplication der beiden Gleichungen ergibt sich hieraus

$$P = \sqrt{P_1 \cdot P_2}$$

Sind diese beiden Werte P_1 und P_2 wenig von einander verschieden, so kann man das geometrische Mittel aus diesen beiden Zahlen durch das arithmetische ersetzen.

Eine andere, vom französischen Physiker Borda eingeführte, Wägungsmethode beseitigt die Einflüsse einer unrichtigen Construction in der Weise, dass man den zu wägenden Körper zuerst mit einer sogenannten Tara ins Gleichgewicht bringt und dann den Körper durch Gewichte ersetzt.

5. Die Decimalwage (Fig. 48) hat den Zweck größere Lasten mit Hilfe kleinerer Gewichte zu wägen. Da also die Kräfte, welche sich das Gleichgewicht halten sollen, ungleich sind, so muss das vermittelnde Hebelsystem so eingerichtet werden, dass die virtuellen Verschiebungen sich verkehrt wie die auftretenden Kräfte verhalten. Es empfiehlt sich nun eine größere Last durch einen Gewichtssatz zu messen, der gerade dem zehnten Theil der Last entspricht. Diesen Zweck erreicht man durch folgendes Hebelsystem. Ist der Hebelarm AO 10mal so lang als der Arm OB und 2mal so lang als OC, so werden sich die Punkte B und C um 1, beziehungsweise 5 cm auf und nieder bewegen, wenn der Punkt A um 10 cm verschoben wird. Mit B wird sich auch der Punkt B' um 1 cm und der Punkt C' mit C um 5 cm heben oder senken. Ruht nun der Hebel $C'E$ im Punkte E auf fester Unterlage, so wird sich auch der Punkt D nur um 1 cm fortbewegen, wenn $DE = {}^1/_5 EC'$ und die Brücke $B'D'$ wird sich daher immer parallel zu sich selbst um 1 cm auf- und niederbewegen, wenn sich die Gewichte auf der Schale bei A zugleich mit dem Punkte A um 10 cm heben oder senken. Kraft und Last werden sich daher das Gleichgewicht halten, wenn die Kraft nur den zehnten Theil der Last beträgt. Dies gilt für alle Lasten, die sich irgendwo auf der ganzen Länge der Brücke befinden und daher wird eine Verschiebung der Last längs der Brücke auf das Gleichgewichtsverhältnis keinen Einfluss ausüben. Nach demselben Principe werden auch Centesimalwagen gebaut, bei denen sich die Gewichte um das Hundertfache der Last verschieben und daher auch nur den hunderten Theil derselben betragen, wenn Gleichgewicht besteht.

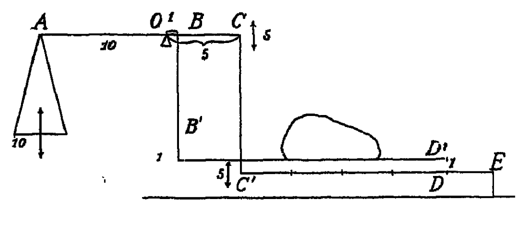


Fig. 48.

Bei der ähnlich construierten Tafelwage sind die virtuellen Verschiebungen für die Last so groß wie für die Gewichte, und daher geben letztere unmittelbar das Gewicht der Last an.

Die drehende Bewegung.

Nebst der gleichförmigen Bewegung auf geradliniger Bahn gibt es noch eine Bewegungsform, auf welche sich das erste Newton'sche Gesetz anwenden lässt, nämlich die drehende Bewegung oder Rotation. Eine solche tritt dann ein, wenn alle auf einer geraden Linie, der Achse liegenden Punkte eines Körpers in Ruhe verbleiben, während sich die übrigen Punkte in kreisförmigen Bahnen um diese Achse herumbewegen.

Wir bezeichnen eine Drehung als gleichförmig, wenn der Quotient aus der Maßzahl der zurückgelegten Umdrehungen und der unterdessen verflossenen Zeitsecunden immer denselben Wert beibehält. Den Wert dieses Quotienten bezeichnet man dann als die Winkelgeschwindigkeit.

Da das Winkelmaß als Verhältnis zweier Strecken den Charakter einer unbenannten Zahl hat, so ist die Dimension der „Winkelgeschwindigkeit" wie auch die der „Tourenzahl"

$$1 : [t] = [t^{-1}]$$

und die Einheit der Winkelgeschwindigkeit

$$1 : (\text{sec}) = 1\ (\text{sec}^{-1})$$

Wenn wir also das erste Newton'sche Gesetz auch auf diesen Fall anwenden, so müssen wir sagen: Jeder Körper verbleibt in Ruhe oder dreht sich mit gleichförmiger Winkelgeschwindigkeit, so lange keine äußere Kraft ihn zu einer Änderung dieses Bewegungszustandes veranlasst.

Wie es vielfach noch gebräuchlich ist, die Geschwindigkeit in Metern anzugeben, ohne die Zeiteinheit zu erwähnen, auf welche sich der zurückgelegte Weg bezieht, so spricht man auch bei der Angabe von Winkelgeschwindigkeiten von einer „Tourenzahl", die sich auf die Minute, und nicht auf die Secunde bezieht.

Nimmt die Winkelgeschwindigkeit proportional mit der Zeit zu, so bezeichnet man den constanten Quotienten aus der Zunahme der Winkelgeschwindigkeit und der unterdessen verflossenen Zeit als Winkelbeschleunigung.

Die Dimension derselben ist also $[t^{-1}] : [t] = [t^{-2}]$ und die Einheit 1 (sec^{-2}).

Eine solche Bewegung können wir als gleichförmig beschleunigt hinstellen, und auf Grund anologer Erwägungen, wie wir sie zur Ableitung der bezüglichen Formeln bei der progressiven Bewegung entwickelt haben, können wir jetzt für die zurückgelegte Drehung n die Formel aufstellen: $n = {}^1/_2\, a\, t^2$, so dass also die Winkelbeschleunigung $a = \frac{2\, n}{t^2}$

Nimmt die Winkelgeschwindigkeit nicht proportional mit der Zeit zu, so spricht man auch hier von einer ungleichförmig beschleunigten Drehung.

Das Vorzeichen kommt bei der Winkelgeschwindigkeit im „Drehungssinn" zur Geltung, die Beschleunigung wechselt aber das Zeichen, wenn die Winkelgeschwindigkeit nicht zu-, sondern abnimmt.

Auch die drehende Bewegung lässt sich sowohl hinsichtlich der Geschwindigkeit wie auch der Beschleunigung durch einen Vector darstellen, indem man eine Strecke construiert, deren Richtung mit der Achse der Drehung parallel ist, deren Maßzahl den zurückgelegten Umdrehungen entspricht und deren Sinn man durch einen Pfeil in der Weise andeutet, dass die Drehung von der Spitze des Pfeiles aus gesehen, um den Schaft im positiven Sinne erfolgt. (Fig. 49.) Der hohe Wert dieser Darstellung zeigt sich wieder darin, dass wir auf diesem Wege die Zusammensetzung und Zerlegung der verschiedensten Drehungen sehr leicht darstellen können.

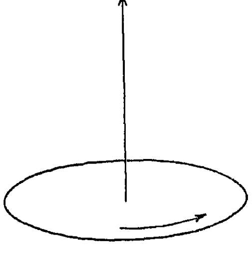


Fig. 49.

Soll ein Körper mehrere Drehungen um dieselbe Achse ausführen, so brauchen wir nur die betreffenden Strecken mit Berücksichtigung ihres Sinnes auf einer Geraden nebeneinander aufzutragen; dann ist die Strecke zwischen dem Anfangspunkte des ersten und dem Endpunkte des letzten Vectors der Vector der resultierenden Drehung. Heben sich die Summen der positiv und negativ bezeichneten Vectoren gegenseitig auf, so kommt keine Drehung mehr zustande; wenn sie sich aber nicht aufheben, so erfolgt eine Drehung mit einer der Differenz beider Geschwindigkeitssummen entsprechenden Tourenzahl.

Vereinigen wir zwei Drehungen mit den Vectoren OA und OB (Fig. 50) und dem gemeinsamen Anfangspunkte O und construieren wir mit Hilfe der Vectoren das Parallelogramm $OAO'B$, so ist dessen Diagonale OO' der Vector der resultierenden Drehung. Legen wir nämlich durch O zwei auf den Vectoren senkrechte Ebenen, so schneiden sich dieselben in der Geraden OC. Hat nun C von der Achse die Entfernung $\frac{1}{2\pi}$, so herrscht hier in der Richtung der Tangente eine Geschwindigkeit, deren Maßzahl gleich ist der Winkelgeschwindigkeit, denn bei jeder Umdrehung legt der Punkt C einen Weg gleich der Längeneinheit zurück. Die Resultierende CC' der beiden Tangentialgeschwindigkeiten CD und CE stimmt auch wieder mit der Maßzahl der resultierenden Drehungsgeschwindigkeit OO' überein. Wir kommen daher genau zum selben Resultate, wie wenn wir mit den Drehungsvectoren OA und OB unmittelbar die Diagonale des Parallelogrammes $OAO'B$ construieren. An die Resultierende dieser beiden Vectoren können wir nun noch einen dritten und einen vierten, ja beliebig viele Vectoren anschließen, so dass wir also das Vectorpolygon $OABCD$ (Fig. 9) ebensogut als Combination mehrerer Drehungen wie mehrerer geradliniger und gleichförmiger Bewegungen auffassen können.

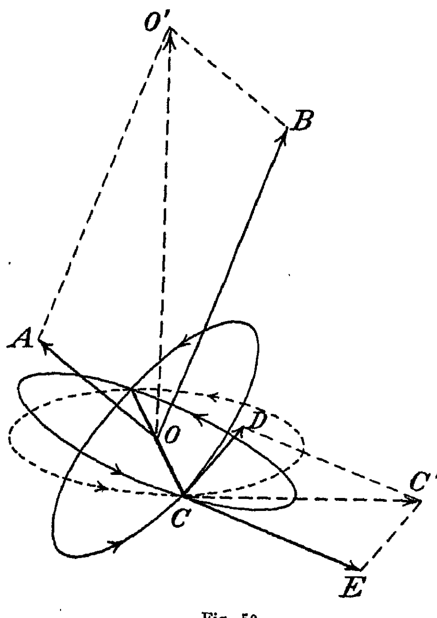


Fig. 50.

Erhalten wir dabei, indem wir immer den Anfangspunkt eines neuen Vectors in den Endpunkt des vorausgegangenen verlegen, ein geschlossenes Polygon $OABCDO$, fällt also der Endpunkt des letzten Vectors mit dem Anfangspunkte des ersten zusammen, so heben sich alle diese Drehungen gegenseitig auf.

Andererseits lässt sich jeder Vector einer gleichförmigen Drehung als Resultierende einer Reihe von Drehungen darstellen oder in solche Drehungscomponenten zerlegen, deren Vectoren in dieser Weise aneinander gereiht, den Vector der gegebenen Drehung ergeben.

Bewegung eines Körpers auf krummliniger Bahn. Fliehkraft.

Wenn man eine Metallkugel an einer Schnur befestigt und im Kreise herumschwingt, so gibt uns die Spannung der Schnur die Richtung der Kraft und den Punkt an, nach dem die Kugel fortwährend hingezogen werden muss, um nicht in der Richtung der Tangente dem Triebe ihrer kinetischen Trägheit zu folgen.

Jede Bewegung, bei der ein Körper eine Beschleunigung nach einem festen Punkte erfährt, heißt Centralbewegung.

Da nun zu jeder Beschleunigung einer Masse eine Kraft nöthig ist, auch wenn es sich nur darum handelt, der Bewegung eine neue Richtung zu geben, so ist immer eine Centripetalkraft nöthig, damit ein Körper eine krummlinige Bahn um ein Bewegungscentrum beschreibe; wie wir nun seinerzeit den Widerstand, den jede Masse der Beschleunigung entgegensetzt, kinetische Trägheit genannt haben, so bezeichnen wir jetzt den Widerstand, welchen der Körper seiner Ablenkung von der geradlinigen Bahn entgegensetzt, als Centrifugalkraft.

Wir wollen nun untersuchen, wie groß die gegen einen Punkt O (Fig. 51) gerichtete Kraft sein muss, damit ein Körper A mit der Masse m eine kreisförmige Bahn beschreibe. Soll also der Körper immer auf einer Kreislinie mit dem Radius r verbleiben, so darf er sich dem Kraftcentrum weder nähern, noch sich von demselben entfernen; da aber jede Annäherung an den Kraftmittelpunkt mit einer Beschleunigung und jede Entfernung von ihm mit einer Verzögerung des Punktes in seiner Bahn verbunden wäre, so muss die Bewegung in der Kreisbahn mit gleichförmiger Geschwindigkeit verlaufen.

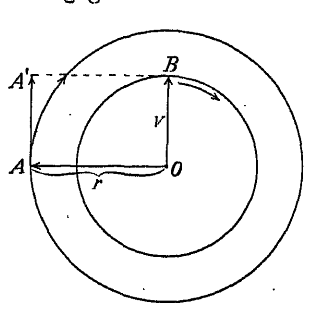


Fig. 51.

Um diese zu bestimmen, brauchen wir nur den Umfang des Kreises $2 r \pi$ durch die Umlaufszeit T zu dividieren und erhalten somit $v = \frac{2 r \pi}{T}$ als Umlaufsgeschwindigkeit.

Die Geschwindigkeit eines sich im Kreise bewegenden Punktes können wir mit Hilfe des Vectors OB darstellen, indem wir diese Strecke von constanter Länge mit derselben Winkelgeschwindigkeit um ihren Anfangspunkt O sich drehen lassen, mit der sich der Körper um das Kraftcentrum herumbewegt.

Der Endpunkt B dieses Geschwindigkeitsvectors beschreibt also wieder einen Kreis mit gleichförmiger Geschwindigkeit, und seine Umlaufszeit wird dieselbe sein, wie die des Körpers A. Um nun die Maßzahl der gegen den Mittelpunkt gerichteten Beschleunigung von A zu finden, müssen wir die Geschwindigkeitsänderung durch die dabei verflossene Zeit dividieren. Der Geschwindigkeitsvector ändert aber nur seine Richtung, indem er in einer gewissen Zeit aus der Lage PP' (Fig. 52) in die Lage PP'' übergeht; wir können aber PP'' als Summe der Bewegungen PP' und $P'P''$, mithin $P'P''$ als Differenz von PP'' und] PP' auffassen. Der Kreisbogen $P'P''$ entspricht also der Geschwindigkeitsänderung während der Zeit, in welcher der Körper A diesen Bogen zurückgelegt hat; für die ganze Umlaufszeit ist daher diese Änderung der vom Punkte B beschriebene Kreisumfang $2 v \pi$. Wenn wir denselben durch die Umlaufszeit T dividieren, so gibt der Quotient $2 v \pi / T$ die Maßzahl der Beschleunigung, mit der die Centripetalkraft den Körper von der tangentialen Richtung ablenken muss, um ihn in der Kreisbahn zu erhalten.

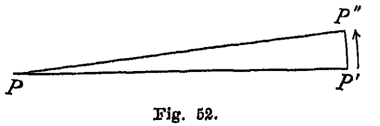


Fig. 52.

Die Kraft, mit der ein Körper gegen den Mittelpunkt des Kreises gezogen werden muss, um dessen Umfang mit der Geschwindigkeit v zu beschreiben, ist also gleich der Beschleunigung $2 v \pi / T$, multipliciert mit der Masse des Körpers m.

Daraus lassen sich nun zwei Ausdrücke für die Fliehkraft, beziehungsweise für die Centripetalkraft ableiten, je nachdem es sich darum handelt, mit welcher Kraft ein Körper von der Masse m eine kreisförmige Bahn mit dem Radius r zu verlassen sucht, wenn er auf derselben n Umläufe in der Secunde macht, oder aber, welche Kraft nöthig ist, um einen Körper, der sich auf dieser Bahn mit der Geschwindigkeit v fortbewegt, von der geradlinigen Richtung weg in eine kreisförmige Bahn mit dem Radius r hineinzuziehen.

Erstere Formel erhalten wir, wenn wir den Wert von $v = 2 r \pi / T$ in die Formel für die Kraft $K = 2 v \pi / T . m$ einsetzen; daraus ergibt sich der Ausdruck $K = 4 \pi^2 r / T^2 . m$;
wenn wir $1/T = n$ setzen, so können wir dafür auch schreiben:

$$K = 4 \pi^2 n^2 r m.$$

Diese Formel ist besonders dann zweckmäßig, wenn ein Körper in einer Zeiteinheit eine größere Anzahl von Umdrehungen macht.

Im zweiten Falle ersetzen wir im Ausdrucke $K = 2\, v\, \pi / T$ das T durc
$2\, r\, \pi / v$ und erhalten so $K = m v^2 / r$.

Soll z. B. ein Körper, während er einen Meter Weges zurücklegt, um eine Centimeter von der gradlinigen Bahn abgelenkt werden, so entspricht diese Krümmun seiner Bahn einem Kreise, dessen Radius r fast 5000 cm beträgt. Hat nun die Mass von 1 kg die Geschwindigkeit von 100 ($\mathrm{cm\, sec^{-1}}$), so ist hiezu eine Kraft von

$$1000 \,.\, 100^2/5000 = 2000 \text{ Dyn},$$

es sind also annähernd 2 kg nöthig.

Hat dieser Körper in seiner Bahn eine doppelt so große Geschwindigkeit, so is zur gleichen Ablenkung schon eine 4 mal stärkere, und bei einer 3 mal größeren Ge schwindigkeit eine 9 mal stärkere Kraft nöthig. Auf diese Weise erklärt es sich, das ein so labil aufgestellter Körper wie das Zweirad bei größerer Fahrgeschwindigkei eine viel größere Stabilität besitzt.

Bei jeder Krümmung des Schienenstranges einer Eisenbahn wird die inner Schiene tiefer verlegt, dass für die mittlere Zugsgeschwindigkeit v die Resultierend aus der horizontal wirkenden Fliehkraft und der verticalen Schwerkraft auf der durc die Schienen gelegten Ebene senkrecht steht.

An einer Schnur von der Länge l hänge ein Körper A (Fig. 53 und bewege sich so, dass die Schnur die Mantelfläche eines Kegels und A einen Kreis mit dem Radius r beschreibt, während sich die Fliehkraft, da Gewicht des Körpers A und der Widerstand der Schnur gegenseitig da Gleichgewicht halten. Man bezeichnet diese Vorrichtung als ein konische

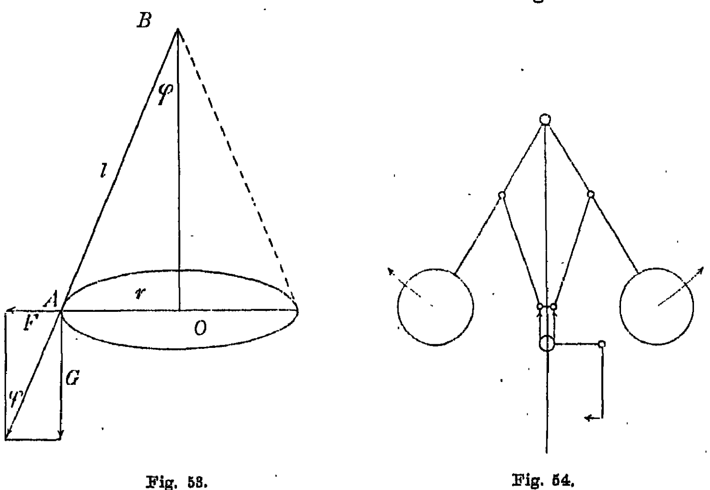


Fig. 53. Fig. 54.

Pendel. Die Lage des Fadens wird dann immer eine solche bleiben, dass di Resultierende aus der Fliehkraft $F = m \,.\, v^2/r = 4\, \pi^2\, m\, n^2 \,.\, r$ und dem Gewicht $G = mg$ in die Richtung der Schnur l fallen; daher besteht die Gleichung

$$4\, \pi^2\, m n^2\, l \,.\, \sin \varphi = mg \,.\, \mathrm{tang}\, \varphi, \text{ weil } r = l \sin \varphi \text{ und } F = mg\, tg\, \varphi.$$

Daher besteht für die Lage der Schnur die von der Masse m ganz unab hängige Beziehung $4\, \pi^2\, n^2\, l \,.\, \cos \varphi = g$.

Aus dieser Formel ersieht man, dass wegen der Unveränderlichkei des g jede Erhöhung der Tourenzahl n mit einer Verminderung des $\cos \varphi$ und daher mit einer Vergrößerung des Winkels φ verbunden ist.

Diese Wechselbeziehung zwischen der Tourenzahl n und dem Ausschlags winkel φ verwendet man beim Centrifugalregulator (Fig. 54), um mit der Hebung der Kugeln bei zu starker Steigerung der Tourenzahl eine Verminderung der Antriebskraft zu verbinden, indem z. B. bei Dampfmaschinen die Dampf zufuhr, bei Turbinen der Wasserzufluss vermindert wird.

Den Einfluss der Geschwindigkeit der Masse und des Krümmungsradius auf die Größe der Fliehkraft kann man mit der Centrifugal- oder Schwungmaschine durch verschiedene Versuche nachweisen. Von zwei Kugeln, die um dieselbe Achse rotieren, entwickelt die kleinere eine größere Fliehkraft, wenn der Halbmesser ihrer Bahn groß genug ist. Bei zunehmender Tourenzahl kann die Fliehkraft eines kleinen Gewichtes hinreichen, eine große Last zu heben. Flüssigkeiten werden dem Zuge der Schwerkraft entgegen von der Rotationsachse möglichst weit weggeschleudert. Ein elastischer Reif, der um einen Durchmesser rotiert, nimmt eine elliptische Form an, weil die von der Achse am weitesten entfernten Theile sich von ihr am stärksten zu entfernen suchen. Damit ist auch gezeigt, dass sich die Abplattung der Erde durch die Rotation um ihre Achse erklären lässt.

Die Kepler'schen Gesetze.

1. Die Planeten bewegen sich in elliptischen Bahnen um die Sonne, die sich in einem der Brennpunkte befindet.

2. Der Radiusvector beschreibt in gleichen Zeiten gleiche Flächen.

3. Der Quotient aus der dritten Potenz der mittleren Entfernung von der Sonne und dem Quadrate der Umlaufszeit hat für alle Planeten des Sonnensystems denselben Wert.

Die beiden ersten Gesetze veröffentlichte Kepler hauptsächlich auf Grund der langjährigen Marsbeobachtungen des Astronomen Tycho Brahe im Jahre 1609 in Prag, das dritte im Jahre 1618 in Linz. Diese drei Gesetze haben lediglich phoronomischen Charakter, d. h. sie enthalten keinen über Raum und Zeit hinausgehenden Begriff. Obwohl auch schon Kepler auf die Vermuthung gekommen war, dass diese Bewegungsformen nur die Folge einer von der Sonne ausgehenden Kraft seien, so hat doch erst Newton im Jahre 1682 diese Bewegungsgesetze aus dem von ihm aufgestellten Gravitationsgesetz geleitet.

Nach dem ersten Gesetze lässt sich für jeden Zeitpunkt die Stellung des Planeten zur Sonne durch die sogenannte Polargleichung der Ellipse

$$r = \frac{p}{1 - \varepsilon \cos u}$$

ausdrücken, in welcher r den Abstand des Planeten von der Sonne oder den Radiusvector und u den Winkel bedeutet, den r mit der durch beide Brennpunkte gelegten großen Ellipsenachse einschließt. Der Parameter p und die astronomische Excentricität ε sind für jede Ellipse unveränderliche Zahlen. Von der Größe der letzteren, die immer kleiner als 1 ist, hängt es ab, ob die Ellipse mehr oder weniger langgestreckt ist, vom Parameter p hängt nur die Größe der Ellipse ab. Setzen wir ε gleich Null, so erhalten wir $r = p$, das heißt der Punkt M hat immer dieselbe Entfernung von der Sonne und bewegt sich daher auf einer kreisförmigen Bahn mit dem Radius p.

Setzen wir dagegen $\varepsilon = 1$, so bilden die Endpunkte des Radiusvectors $r = p / (1 - \cos u)$ eine Parabel. Ist nämlich M (Fig. 55) ein Punkt der Parabel, so ist $NM = r \cdot \cos u$ und

$$QM = FM = p + r \cos u = r,$$

mithin $p = r\,(1 - \cos u)$; die Entfernung des Punktes M von der Leitlinie ist dann also dieselbe wie die vom Brennpunkte.

Fig. 55.

Für jeden anderen Wert von ε und p erhalten wir die den einzelnen Winl größen u entsprechenden Ellipsenpunkte M durch die Construction nach Fig. 56.

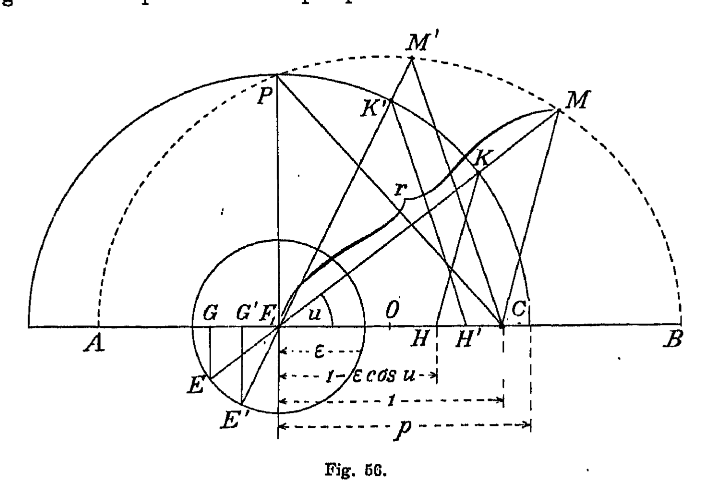


Fig. 56.

Wir le durch den Bre punkt F_1 eine liebige Gerade, mit der Stre $F_1\,C$ den Win u einschließt Diese wird einem Kreise dem Radius ε i geschnitten ı es ist

$F_1\,G = \varepsilon$ cos

Wenn d $HC = \varepsilon \cos u$ macht wird, so $F_1\,H = 1 - \varepsilon$ c

Verbinden endlich H mi und ziehen dann durch eine Parallele HK, welche die ursprüngliche Gerade in M schneidet, so ist M ein Ellipsenpu denn $F_1\,M : F_1\,C = F_1\,K : F_1\,H$ und wegen $F_1\,K = p$ und $F_1\,M = r$ ist d

$r : 1 = p : (1 - \varepsilon \cos u)$, also $r = \dfrac{p}{1 - \varepsilon \cos u}$

Wenn man diese Construction für alle Winkel u durchführt, so erhält n sämmtliche Ellipsenpunkte M. Wählt man den Punkt E auf einem Kreise mit d Radius 1, so erhält man eine Parabel, und wenn man dieselbe Construction mit ein Kreise durchführt, dessen Radius ε größer als 1 ist, so erhält man die zweiäst Hyperbel. Alle drei Curvenarten Einschluss des Kreises fasst man un dem Namen Kegelschnittslinien sammen, weil je nach der Lage Ebene, die man durch einen Doppelke legt, die Schnittlinie die eine oder andere dieser Formen annimmt. I Winkel $u = G\,F_1\,E$ bezeichnet man in Astronomie als die wahre Anoma Kennen wir umgekehrt nebst dem Bre punkte F_1 zwei Punkte M_1 und M_2 Ellipse und die Richtung, in der Planet sich bewegt, so können wir dar p und ε ableiten. (Fig. 57.)

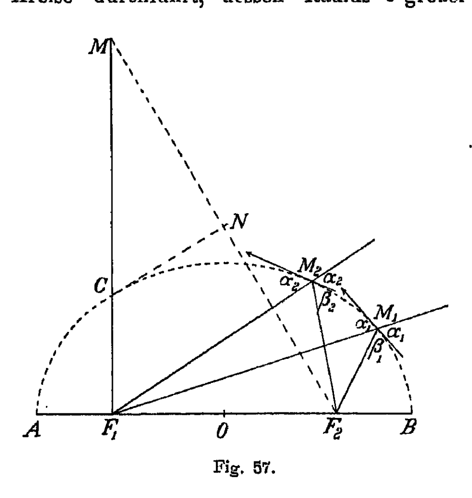


Fig. 57.

Da nämlich die Tangente an Ellipse mit den beiden Leitstrahlen glei Winkel einschließt, so brauchen wir $\beta_1 = \alpha_1$ und $\alpha_2 = \beta_2$ zu machen, um z Strahlen zu erhalten, die sich im zwei Brennpunkte F_2 schneiden. Dann $F_1\,F_2 = 2\,e$, also gleich der doppel „linearen Excentricität" und

$$F_1\,M_1 + M_1\,F_2 = 2\,a,$$

wo a die halbe große Achse der Ellipse bedeutet. e/a ist dann die astronomische o numerische Excentricität ε. Den Parameter finden wir, indem wir auf der Senkrech in F_1 die Strecke $F_1\,M = 2\,a$ auftragen, dann den Punkt M mit F_2 verbinden und Halbierungspunkte N die Senkrechte $N\,C$ errichten, welche $F_1\,M$ in C schnei $F\,C = p$ ist dann der gesuchte Parameter p; denn $F_1\,C \perp F_1\,F_2$ und

$$F_1\,C + C\,F_2 = 2\,a = F_1\,C + C\,M.$$

Von den Planeten hat Mercur mit 0·2 die größte, und Venus mit 0·007 die kleinste Excentricität; die der Erde ist 0·017; mithin sind fast alle Planetenbahnen nahezu kreisförmig.

2. Das zweite Kepler'sche Gesetz, welches uns über die Geschwindigkeit der Planeten in ihrer Bahn unterrichtet, ist lediglich eine Folge des Trägheitsprincipes, das nebst der Anziehung durch die Sonne die Planetenbewegung beherrscht (Fig. 58).

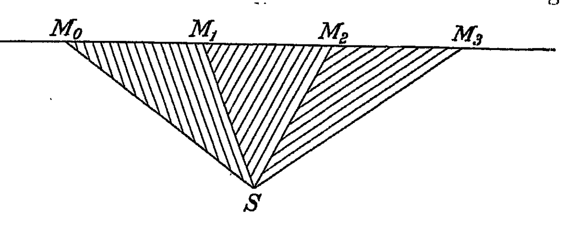


Fig. 58.

M_0 M_1 M_2 ... seien Punkte, welche ein mit constanter Geschwindigkeit auf geradliniger Bahn sich fortbewegender Körper nach gleichen Zeiträumen passiert; verbinden wir dieselben mit einem außerhalb der Bahn befindlichen Punkte S, so erhalten wir eine Reihe von Dreiecken mit einer gemeinsamen Spitze in S und gleichen Grundlinien. Infolgedessen sind auch die Flächeninhalte dieser Dreiecke gleich, und wir können daher sagen, dass bei der gleichförmigen Bewegung auf geradliniger Bahn die Flächengeschwindigkeit des Radiusvectors SM in Bezug auf jeden außerhalb der Bahn liegenden Punkt constant ist.

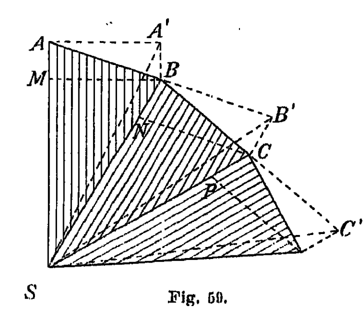


Fig. 59.

Erhält nun der Körper eine gegen einen Punkt S gerichtete Beschleunigung, so bleibt diese constante Flächengeschwindigkeit nur für diesen einzigen Punkt bestehen, weil sich in der Richtung der Tangente die Geschwindigkeit infolge des Trägheitsprincipes nicht ändert (Fig. 59).

Ist nämlich AB der Vector der Geschwindigkeit, mit welcher der Planet den Punkt B erreicht, so würde er sich vermöge der Trägheit mit derselben Geschwindigkeit in der Richtung BB' fortbewegen und der Vector SB' in gleichen Zeiten gleiche Flächen beschreiben; wenn nun neuerdings eine gegen S gerichtete Beschleunigung mit dem Vector BN eine Schwenkung hervorruft, so ändert dieselbe an der Flächengeschwindigkeit nichts, weil nach dem Principe der Zusammensetzung von Bewegungen CB' parallel zu BS und daher das Dreieck SBB' flächengleich ist mit SBC. Für den Punkt C gilt wieder dasselbe wie für B, und es ist daher für die Erhaltung einer constanten Flächengeschwindigkeit ganz gleichgiltig, ob die gegen S gerichtete Beschleunigung in den Punkten A, B, C u. s. w. immer dieselbe bleibt oder nach irgend einem Gesetze zu- oder abnimmt. Da nun der Radiusvector während eines Umlaufes die ganze Planetenbahn beschreibt, deren Flächeninhalt gleich $ab\pi$ ist, wenn a und b die große und kleine Halbachse der Ellipse bedeuten, so hat die Flächengeschwindigkeit F bei der Umlaufszeit T den Wert $F = \frac{ab\pi}{T}$; da für die Erdbewegung um die Sonne angenähert $a = 1487 \,.\, 10^{10}$ cm, $b = 1490 \times 10^{10}$ cm, $T = 31450000$, so ist $F = 22{\cdot}1 \times 10^{20}$ (cm² sec⁻¹).

Um also die Geschwindigkeit in einem bestimmten Punkte der Bahn annähernd zu finden, brauchen wir nur die doppelte Flächengeschwindigkeit durch die jeweilige Entfernung des Planeten von der Sonne zu dividieren, denn das während einer Secunde vom Vector beschriebene Dreieck hat bei einer nahezu kreisförmigen Bahn die Entfernung von der Sonne zur Höhe und den in der Secunde zurückgelegten Weg zur

Grundlinie. Bei abnehmender Entfernung nimmt daher die Geschwindigkeit zu und ist in der Sonnennähe am größten. (Fig. 60.) Weil also $f_1 = f_2$ und $F_1 P_2 > F_1 P_1$, so muss $P_2 P'_2 < P_1 P'_1$, also wird sich der Planet in der letzteren Stellung mit geringerer Geschwindigkeit bewegen.

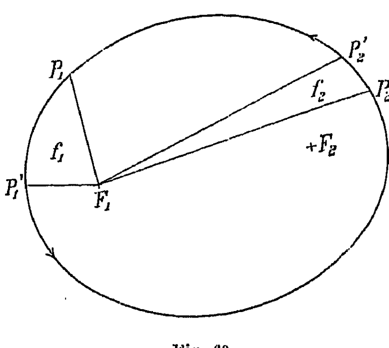


Fig. 60.

3. Während die beiden ersten Gesetze die Bewegung jedes Planeten in seiner eigenen Bahn beschreiben, verknüpft das dritte Gesetz alle Planetenumläufe des ganzen Sonnensystems zu einem einheitlichen Bewegungsgebilde.

Dieses Gesetz lässt sich auch durch ein mechanisches Bild veranschaulichen, wenn wir uns vorstellen, dass sich die Massen an der Oberfläche einer rotierenden veränderlichen Kugel um so schneller um den Äquator drehen, je kleiner der Radius wird; dadurch wird die Umlaufszeit sowohl wegen der Abnahme des Umfanges als auch infolge der Zunahme der Geschwindigkeit immer kleiner. Nimmt dann mit dem Quadrate der Umlaufszeit auch das Volumen im gleichen Verhältnis ab, so ändert sich jenes proportional der dritten Potenz des Radius. So beträgt z. B. die Umlaufszeit des Saturn 10 759 und die des Uranus 30 688 Tage, also 2·86 mal mehr; die Quadrate dieser Zahlen verhalten sich annähernd wie 1 : 8 (genauer 1 : 8·132) und die mittleren Abstände dieser Planeten von der Sonne betragen 9·539 und 19·183 Erdhalbmesser; thatsächlich ist auch

$$\left(\frac{19{\cdot}183}{9{\cdot}539}\right)^3 = 8{\cdot}132.$$

Das erste der drei Kepler'schen Gesetze unterrichtet uns also über die Form der Planetenbahnen, das zweite über die Geschwindigkeitsänderung der Planeten während eines Umlaufes und das dritte fasst endlich alle Planetenbewegungen zu einem einzigen Bewegungscomplex zusammen, der das ganze Sonnensystem nicht nur räumlich, sondern auch dynamisch als ein einheitliches Ganzes im Sinne der Kant-Laplace'schen Theorie erscheinen lässt, derzufolge alle Planeten aus einer feurig-flüssigen Masse ausgeschieden wurden, die sich allmählich zusammenzog und dabei immer rascher drehte.

Die Gravitation.

Es war dem großen Physiker Newton vorbehalten, das ganze System der planetarischen Bewegungen, welche Kepler nur nach Raum und Zeit klargelegt hatte, dynamisch durch ein einziges Gesetz zusammenzufassen, und zwar mit Hilfe des Gravitationsbegriffes. Unter der **Gravitation** versteht man die Eigenschaft der Massen, auf andere Massen in der Weise einzuwirken, dass sie in der Richtung der Verbindungslinie eine Beschleunigung erfahren. Diese Beschleunigung der angezogenen Masse ist der anziehenden Masse direct und dem Quadrate der Entfernung verkehrt proportional. Die Kraft, mit der sich zwei Körper anziehen, ist daher dem Producte der Massen direct und dem Quadrate des Abstandes verkehrt proportional. Den ganzen eine Masse umgebenden Raum, in dem sich diese Wirkung zeigt, nennen wir ihr Gravitationsfeld.

Schon im Jahre 1666 soll Newton, als er in seiner Heimat zu Woolsthorpe in der Grafschaft Lincoln weilend, einen Apfel vom Baume fallen sah, den Gedanken gefasst haben, die lebendige Kraft der frei fallenden Körper stamme aus derselben Quelle, durch die auch der Mond verhindert werde, dem Zuge der Fliehkraft Folge zu leisten und sich dauernd von der Erde zu entfernen. Der Versuch, die Identität dieser beiden Kräfte nachzuweisen, scheiterte aber daran, dass Newton damals den Radius der Erdbahn nicht genau kannte. Erst 16 Jahre später, als er in einer Sitzung der „Royal Society" von einer neuen Meridianmessung durch den Franzosen Picard erfuhr und mit Hilfe dieser Angaben die Rechnung wiederholte, stellte sich eine befriedigende Übereinstimmung heraus.

Der Mond ist der Erde so nahe, dass man seine Entfernung auf trigonometrischem Wege mit großer Genauigkeit bestimmen kann; so findet man, dass sie

$$r = 60{\cdot}278 \text{ Erdradien} = 384420 \text{ km} = 3{\cdot}8442 \,.\, 10^{10} \text{ cm}$$

beträgt. Wenn also die Beschleunigung gegen die Erde in dieser etwa 60mal größeren Entfernung 60^2mal kleiner ist als auf der Erdoberfläche, so muss eine Beschleunigung von $981 : 3600 = 0{\cdot}27$ (cm sec^{-2}) hinreichen, um die Fliehkraft beim Mondumlaufe zu überwinden. Die Länge der Mondbahn ist bei der angegebenen Entfernung $2\pi \,.\, 60 \,.\, R = 378$ Erdradien $= 2410 \,.\, 10^8$ cm, folglich die Geschwindigkeit in der Bahn bei einer Umlaufszeit von 27·32 Tagen $= 23{\cdot}6 \,.\, 10^5$ Secunden gleich $1021 \,.\, 10^2$ (cm sec^{-1}); mithin ist auch die Beschleunigung der Fliehkraft $v^2 : r = 0{\cdot}27$ (cm sec^{-2}). Sie entspricht also einem Werte, welcher dem früher angeführten so nahe kommt, dass dadurch Newton seine Vermuthung bestätigt finden konnte. Eine weitere Bestätigung für die Richtigkeit dieser Ansicht liegt in der Giltigkeit des dritten Kepler'schen Gesetzes. Diesem zufolge ist für alle Planeten das Product $r^3 n^2 = \frac{r^3}{T^2}$ gleich groß. Für die Fliehkräfte zweier Planeten besteht die Proportion:

$$F_1 : F_2 = m_1 r_1 n_1^2 : m_2 r_2 n_2^2 = \frac{m_1}{r_1^2} (r_1^3 n_1^2) : \frac{m_2}{r_2^2} \,.\, (r_2^3 n_2^2) = \frac{m_1}{r_1^2} : \frac{m_2}{r_2^2},$$

das heißt, wenn das dritte Kepler'sche Gesetz gilt, so wird die Fliehkraft der Planeten durch Kräfte aufgehoben, die den Massen direct und den Quadraten der Entfernungen verkehrt proportional sind.

In der Lehre vom Magnetismus und von der Elektricität werden wir einem ganz ähnlich lautenden Naturgesetze begegnen, nur handelt es sich dort nicht um Massen in dem Sinne, wie wir sie hier in Betracht ziehen.

Dass sich überhaupt alle Massen nach diesem Gesetze gegenseitig anziehen, hat Cavendish 1798 experimentell nachgewiesen. Er befestigte zu diesem Zwecke an einem Drahte einen leichten Stab aus Tannenholz (Fig. 61), an dessen Enden zwei kleine Bleikugeln *A* und *B* angebracht waren. Stellte man letzteren zwei sehr große Bleikugeln, jede im Gewichte von 158 kg, einmal in der Lage *MM* und dann in der Lage *NN* gegenüber, so wurde der Stab *AB* beide Male in der Richtung gegen die Bleikugeln aus seiner Ruhelage abgelenkt. Kennen wir aber die Beschleunigung *a*, welche eine Kugel aus Blei vom specifischen Gewichte 11·3 auf die Kugel *A* in der Entfernung *d* ausübt, so lässt sich daraus die durchschnittliche Dichte der Erde berechnen, wenn dieselbe an ihrer Oberfläche dem Körper die Beschleunigung $g = 981$ (cm sec^{-2}) ertheilt. Die Versuche von Cavendish ergaben übereinstimmend mit ganz anderen Messmethoden als mittlere Dichte der Erde 5·5.

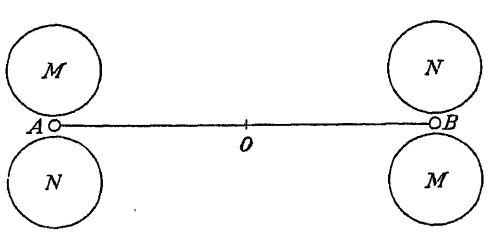


Fig. 61.

Um ganz allgemein die Intensität des Gravitationsfeldes zu bestimmen, das ein Körper an einer bestimmten Stelle hervorruft, hat man aus diesem Versuche die Kraft ermittelt, mit der 1 g von einer anderen Grammasse angezogen wird, wenn die Mittelpunkte beider Grammassen 1 cm voneinander entfernt sind. Dieselbe beträgt $6{\cdot}6 \,.\, 10^{-8}$ Dyn, d. h. es müssten in einem Punkte 660 Tonnen vereinigt sein, um in einer Entfernung von 1 cm eine Beschleunigung von 1 (cm sec^{-2}) hervorzurufen. Diese Zahl, mit der man die in Gramm ausgedrückte Masse multiplicieren muss, um die Beschleunigung in der Entfernung von 1 cm zu erhalten, nennt man Gravitationsconstante.

Nachdem sich so bestimmen lässt, wie groß die Masse der Erde sein muss, damit ihr Gravitationsfeld der Fliehkraft des Mondes das Gleichgewicht hält, können wir auch die Masse der Sonne berechnen, deren Anziehungskraft die Erde und alle übrigen Planeten in ihrer Bahn festhält. Bedeutet M die Masse der Sonne, r ihre Entfernung von der Erde und $n = 1 : T$ deren Umlaufszahl, so muss die Beschleunigung gegen die Sonne

$$6{\cdot}6 \,.\, 10^{-8} \frac{M}{r^2} = \frac{v^2}{r} = 4\,\pi^2\, n^2\, r,$$

also gleich sein der Beschleunigung der Fliehkraft der Erde auf ihrer Bahn um die Sonne. Folglich ist die Masse der Sonne $M = 4\,\pi^2\, r^3 \,.\, n^2 \,.\, 10^8 : 6{\cdot}6 = 331000$ Erdmassen.

Aus der Gleichung $\frac{r^3}{T^2} = r^3\, n^2 = \frac{6{\cdot}6}{4\,\pi^2 \,.\, 10^8} M$ ergibt sich zugleich, dass dieser constante Ausdruck dem dritten Kepler'schen Gesetze zufolge deshalb für alle Planeten denselben Wert hat, weil er nur von der Masse der Sonne abhängt.

Wäre die Gestalt der Erde genau kugelförmig und hätte sie in allen ihren Theilen eine vollkommen symmetrische Massenvertheilung, so müsste die Resultierende aller ihrer Anziehungskräfte überall gleich groß sein und immer durch den Mittelpunkt der Erdkugel gehen. Eine derartige Regelmäßigkeit herrscht aber, wie die hierüber angestellten Messungen ergeben, weder hinsichtlich der Stärke, noch bezüglich der Richtung, und zwar erstens, weil die Erde nicht genau die Gestalt einer Kugel hat, sondern eher die eines Rotationsellipsoides, zweitens macht sich auch die Fliehkraft geltend.

Errichten wir im Punkte P des Ellipse (Fig. 62) die Tangente PT und auf dieser die Senkrechte PQ, so schließt dieselbe mit der Richtung PM einen Winkel von 11·3' ein, wenn sich die Halbmesser der Ellipse wie 299 : 300 verhalten, wie es bei der Erde der Fall ist, und der Winkel $AMP = 45^0$. Schon darum weicht die zum Erdmittelpunkte gezogene Gerade von der Lothlinie in der geographischen Breite von 45° um diesen Winkel ab. Ausserdem nimmt noch die Intensität der Schwerkraft in höheren Breiten wegen der Annäherung an den Erdmittelpunkt fortwährend zu.

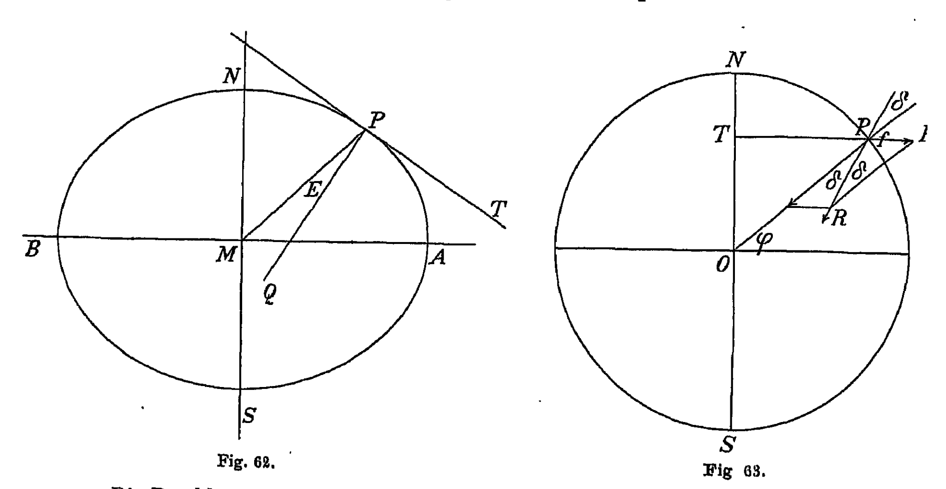


Fig. 62. Fig 63.

Die Beschleunigung F der Fliehkraft beträgt für einen Punkt auf dem Äquator, wo die Umlaufszahl $n = 1 : T = 1 : 86164 = 0{\cdot}00001161$,

$$F = 4\,\pi^2\, n^2\, r = 4 \,.\, 9{\cdot}87 \,.\, 0{\cdot}00001161^2 \,.\, 6377 \,.\, 10^5 = 3{\cdot}39 \text{ (cm sec}^{-2}).$$

Für einen Punkt P in der geographischen Breite φ kommt bei der Drehung nur der Radius $TP = r \cos \varphi$ (Fig. 63) in Betracht, und daher ist in dieser Breite die Beschleunigung der Fliehkraft $f = F \,.\, \cos \varphi$.

Da die Vectoren der Beschleunigungen der Schwerkraft FR, der Fliehkraft PF und ihrer Resultierenden PR das Dreieck PFR bilden, so besteht dem Sinussatze zufolge die Proportion

$$\sin \delta : \sin \varphi = 3{\cdot}39 \cos \varphi : 981.$$

Daher ist $\sin \delta = \frac{3\cdot39}{981} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi = 0\cdot00173 \cdot \sin 2\varphi$.

Für die geographische Breite von 45° ist also $\sin \delta = 0\cdot00173 = \sin 0^0 6'$.

Die Resultierende aus der Fliehkraft und Schwerkraft weicht also im südlichen Europa von der Richtung der letzteren um einen Winkel von etwa 6' ab. Von der Fliehkraft in der Richtung PF entfällt aber nur eine Componente in die Richtung PR, welche von ihr um $\varphi + \delta^0$ abweicht; daher ist $f' = f \cos(\varphi + \delta)$ oder da φ durch δ nicht wesentlich vergrößert wird,

$f' = f \cos \varphi = F \cdot \cos^2 \varphi = 3\cdot39 \cos^2 \varphi$, für $\varphi = 0$ ist $f' = 3\cdot39$ (cm sec^{-2}).

In Aequatorialgegenden beträgt die Beschleunigung unter dem Einflusse der Fliehkraft 981·5, also ohne die Fliehkraft 981·5 — 3·39 = 978·1 (cm sec^{-2}).

Wegen $\cos^2 \varphi = 1 - \sin^2 \varphi$ ist aber die Beschleunigung in der geogr. Br. φ
$981\cdot5 - 3\cdot39 \cos^2 \varphi = 981\cdot5 - 3\cdot39 + 3\cdot39 \sin^2 \varphi =$

$$= 978\cdot1 \left(1 + \frac{3\cdot39}{978\cdot1} \sin^2 \varphi\right) = 978\cdot1\,(1 + 0\cdot00347 \sin^2 \varphi) \text{ (cm sec}^{-2}\text{)}.$$

Directe Messungen ergaben jedoch $9\cdot781\,(1 + 0\cdot00512 \sin^2 \varphi)$, weil dabei auch die Abplattung der Erde zur Geltung kommt.

Die schwingende oder harmonische Bewegung.

Mit der Centralbewegung in einer kreisförmigen Bahn steht die schwingende, oscillierende oder harmonische Bewegung im engsten Zusammenhange. Fällen wir von einem mit gleichförmiger Geschwindigkeit sich im Kreise bewegenden Punkte M (Fig. 64) eine Senkrechte auf den Durchmesser AB, so führt deren Fußpunkt P auf demselben die „harmonische" Bewegung aus. Die Entfernung a der Punkte A und B vom Mittelpunkte C bezeichnet man dann als die Amplitude oder Schwingungsweite und die jeweilige Entfernung x des schwingenden Punktes P von C als seine Elongation in diesem Augenblicke.

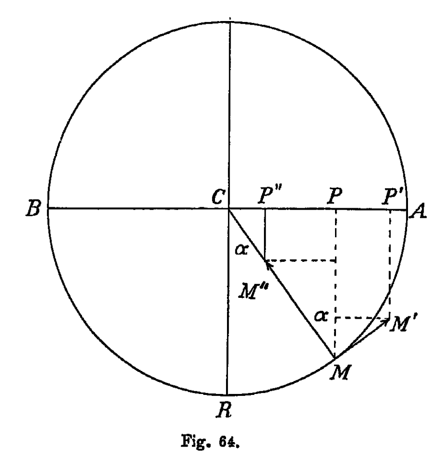


Fig. 64.

Um die Bewegung genau zu beschreiben, müssen wir in jedem Augenblicke die Stellung des schwingenden Punktes P, seine Geschwindigkeit und seine Beschleunigung kennen. Den Zusammenhang zwischen diesen Größen vermittelt uns der auf der Kreisperipherie sich bewegende Punkt M, welcher in der Zeit T den Umfang mit gleichförmiger Geschwindigkeit zurücklegt. Seine Projection gibt uns nämlich die Lage, die Projection seiner Geschwindigkeit die Geschwindigkeit des Punktes P und die Projection seiner gegen den Mittelpunkt gerichteten Beschleunigung die Beschleunigung des Punktes P in der Geraden AB an. Wegen dieses Zusammenhanges zwischen den Bewegungen beider Punkte empfiehlt es sich auch, jene Zeit als Schwingungsdauer zu bezeichnen, während welcher der Punkt M die ganze Peripherie des Kreises beschreibt, obwohl es beim Pendel auch üblich ist, die Hälfte dieser Bewegung als eine Schwingung zu bezeichnen. Die Anzahl der Schwingungen in einer Secunde nennt man Schwingungszahl.

Der Punkt M bewege sich vom Augenblicke $t = O$ angefangen von der Ruhelage R aus, während sich gleichzeitig der Punkt P von C aus nach rechts bewegt und zur Zeit t die Entfernung $CP = x$ erreicht, nach-

dem der Radius $CM = a$ den Winkel α beschrieben hat. Es besteht dann die Proportion arc $\alpha : 2a\pi = t : T$, daher ist arc $\alpha = \frac{2a\pi}{T} \cdot t$ und $\alpha = \frac{2\pi}{T} t$.

Die Geschwindigkeit des Punktes M in der Kreisbahn ist also $c = 2a\pi : T$ und die Beschleunigung der Centripetalkraft in der Richtung gegen C ist $b = \frac{c^2}{a} = \frac{4\pi^2 a}{T}$.

Daraus ergeben sich für die Bewegung des Punktes P folgende Formeln:

1. $CP = x = a \cdot \sin\alpha = a \cdot \sin \frac{2\pi}{T} t.$

2. $PP' = v = MM' \cdot \cos\alpha = c \cdot \cos \frac{2\pi}{T} t = \frac{2a\pi}{T} \cos \frac{2\pi}{T} t.$

3. $PP'' = b = -MM'' \cdot \sin\alpha = -\frac{4\pi^2 a}{T^2} \sin \frac{2\pi}{T} t.$

Weil ferner $\sin \frac{2\pi}{T} t = x : a$, so erhalten wir für die Beschleunigung auch noch den Ausdruck $b = -\frac{c^2}{a} \cdot \frac{x}{a} = -\frac{c^2}{a^2} \cdot x = -\frac{4\pi^2}{T^2} \cdot x.$

Bei der harmonischen Bewegung eines Punktes ist die Beschleunigung gegen den Mittelpunkt gerichtet und der Entfernung x von demselben proportional. Infolgedessen stellen sich solche Schwingungen auch ein, wenn man z. B. eine lange Spiralfeder streckt und plötzlich loslässt.

Wird eine derartig schwingende Bewegung durch Reibung oder durch den Widerstand des Mittels beeinträchtigt, so nimmt wohl die Schwingungsamplitude, nicht aber die Schwingungszahl ab. Man sagt dann, die Schwingungen werden gedämpft; wenn schließlich der schwingende Körper die ganze lebendige Kraft, die er beim Oscillieren entwickelte, an seine Umgebung abgegeben hat, so bezeichnet man dies als Absorption der Schwingungsenergie. Man bemisst letztere nach der lebendigen Kraft des schwingenden Körpers im Ruhepunkte, also nach dem Ausdrucke $m \frac{v^2}{2} = m \frac{2\pi^2 a^2}{T^2}$, wenn m die Masse desselben bedeutet.

Das Pendel.

Eine der harmonischen Schwingung sehr nahe kommende Bewegung können wir herbeiführen, wenn wir ein mathematisches Pendel, d. h. eine punktförmige Masse, die an einem gewichtlosen Faden hängt, in Schwingungen versetzen; annähernd erhalten wir ein solches, indem wir eine kleine Bleikugel an einem dünnen Faden befestigen. (Fig 65.) Bringen wir die Kugel in die Lage P, so wird die in die Richtung des verlängerten Fadens entfallende Componente der Schwerkraft durch die Festigkeit des Fadens aufgehoben. Die Componente, welche in die Richtung der Tangente PP' fällt, gibt dem Pendelkörper eine Beschleunigung in der Richtung gegen R. Aus der Ähnlichkeit der Dreiecke OPC und SPN ergibt sich die Proportion:

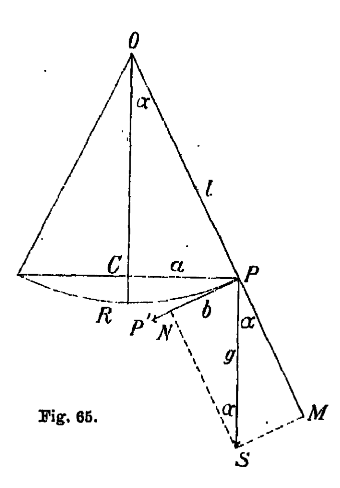


Fig. 65.

$$OP : PC = SP : PN \text{ oder } l : a = g : b.$$

Dabei haben wir die Amplitude $CP = a$, die Beschleunigung der Schwerkraft $PS = g$ und die in die Richtung PP' entfallende Beschleunigung $PN = b$ gesetzt. Ist der Winkel α sehr klein, so fallen die Strecken PC und PP' nahezu mit dem Bogen PR zusammen, und da der obigen Proportion zufolge
$$b = a \, . \, g : l,$$
so ist die Beschleunigung b des Punktes P dem Abstande a von der Ruhelage R proportional. Daher ist die für das Zustandekommen einer harmonischen Schwingung aufgestellte Bedingung annäherungsweise erfüllt.

Wir können daher diese schwingende Bewegung durch die Formel zur Darstellung bringen
$$x = a \, . \, \sin \frac{2\pi}{T} t,$$
wobei die Beschleunigung b in der Entfernung a von R ihrem absoluten Werte nach $b = \frac{4\pi^2}{T^2} \, . \, a = \frac{g}{l} \, . \, a$, also $\frac{4\pi^2}{T^2} = \frac{g}{l}$, und $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$, wenn wir das einmalige „Hin- und Hergehen" als eine einzige Schwingung auffassen; wenn wir aber einen Hin- oder einen Hergang allein schon als eine Schwingung auffassen, so ist
$$T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Wenn man statt der Schwingungszeit die Schwingungszahl, also $\frac{1}{T} = n$ setzt, so kann man statt der obigen Formel auch die folgende verwenden:
$$n = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}.$$

Aus dieser Formel lassen sich folgende, mit der Erfahrung übereinstimmende Erscheinungen ableiten.

Da in diesem Ausdrucke weder die Masse des Pendelkörpers, noch der Ausschlagswinkel vorkommt, so hängt die Schwingungszeit nicht davon ab, ob dieselben größer oder kleiner sind. Bezüglich des Ausschlagswinkels ist dies wenigstens für Winkel der Fall, die kleiner als 5^0 sind, weil unter dieser Bedingung die Beschleunigung der Elongation annähernd proportional ist.

Wenn man mehrere Pendel mit verschieden schweren Körpern aber gleicher Länge schwingen lässt, so zeigen sie alle die gleiche Schwingungszahl, aber die leichteren Pendel werden durch den Luftwiderstand stärker gedämpft. Wir müssen ferner die Länge eines Pendels 4 mal, 9 mal, .. n^2 mal größer nehmen, damit die Schwingungszahl auf die Hälfte, auf ein Drittel oder auf $\frac{1}{n}$ herabsinke, also die Schwingungsdauer doppelt, dreimal oder n mal so groß werde.

Der Einfluss der Beschleunigung g lässt sich nach Mach (Fig. 66) dadurch zeigen, dass man nur eine Componente der Schwerkraft zur Wirkung kommen lässt, indem man die Achse, um welche das Pendel sich dreht, schief aufstellt. Statt des Fadens müssen in diesem Falle zwei unbiegsame Stäbe zur Befestigung des Pendelkörpers verwendet werden, und dann haben wir es noch weniger als früher mit einem mathematischen Pendel zu thun. Der Versuch zeigt aber wenigstens annähernd, dass z. B. die Schwingungszahl von 120 auf 108 sinkt, also im Verhältnis 10 : 9 abnimmt, wenn wir die Achse um fast $\alpha = 36^0$ neigen. Dadurch wird nämlich die Beschleunigung der Schwerkraft im Verhältnis
$$g : g \cos 36^0 = 100 : 81 = 10^2 : 9^2,$$
mithin ungefähr im Verhältnis 5 : 4 vermindert.

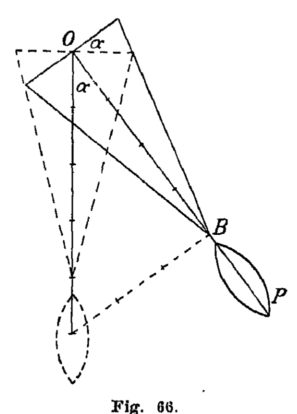


Fig. 66.

Wenn wir die Schwingungsdauer eines Pendels kennen, so lässt sich mittels der Formel für die Schwingungszeit aus der Länge des Pendels die Beschleunigung der Schwerkraft und die Stärke ihrer Variationen in verschiedenen geographischen Breiten und Höhen über dem Meere berechnen. Wenn wir ein Pendel in der Weise regulieren, dass es im Laufe eines mittleren Sonnentages gerade 86400 Schwingungen macht, so entspricht jede Schwingung genau einer Secunde und wir bezeichnen es deshalb als ein Secundenpendel. Dabei pflegt man jeden Hin- und Hergang als eine neue Schwingung zu zählen. Wir müssen demnach in der obigen Formel $T = 2 \text{ Sec.} = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ setzen, um die Länge des Secundenpendels $l = g : \pi^2 = 981 : 9{\cdot}87 = 99{\cdot}3$ cm zu erhalten, das also nahezu die Länge eines Meters hat.

Wenn man statt eines mathematischen Pendels einen wie immer geformten Körper um eine Achse schwingen lässt, die nicht durch den Schwerpunkt hindurchgeht, so nennt man ein solches Pendel ein physisches. Streng genommen kann es also überhaupt nur physische Pendel geben, da es weder einen gewichtslosen Faden noch einen Pendelkörper ohne Ausdehnung gibt. Wie man sich leicht überzeugen kann, stimmt die Länge eines mathematischen Pendels von gleicher Schwingungsdauer mit dem Abstand des Schwerpunktes vom Aufhängepunkt nicht überein. Die vom Drehungspunkte am weitesten entfernten Massen werden durch die ihm näher liegenden beschleunigt, und die kürzeren Schwingungen, welche die letzteren infolge der geringeren Pendellänge zu machen suchen, werden durch erstere verzögert; daher muss es im schwingenden Körper Punkte geben, deren Entfernung vom Drehungspunkt der Länge eines mathematischen Pendels von gleicher Schwingungszeit entspricht. Diese Länge können wir uns nach der Formel $l = \frac{g}{4\pi^2} T^2$ berechnen; man bezeichnet dieselbe als die reducierte Pendellänge. Tragen wir diese auf einem zur Längsachse symmetrisch gebauten physischen Pendel, z. B. auf der Längsachse eines geraden Stabes vom Drehungspunkte aus auf, so erhalten wir den Schwingungsmittelpunkt S, der genau so schwingt, als wenn die übrigen Massen nicht da wären. Hätten wir einen gewichtslosen Faden von dieser Länge, an dessen beiden Enden je eine Kugel befestigt ist, so würde sich dieses mathematische Pendel mit derselben Schwingungsdauer bewegen, gleichviel ob wir es an der einen oder an der anderen Kugel halten. Geradeso ändert sich auch die Schwingungszeit eines physischen Pendels nicht, wenn wir den Schwingungsmittelpunkt als Drehungspunkt verwenden, denn die übrigen Massen verhalten sich wie früher für die Drehungsgeschwindigkeit des Stabes indifferent. Die reducierte Pendellänge bleibt in beiden Fällen dieselbe.

Fig. 67.

Gelingt es uns umgekehrt an einem physischen Pendel (Fig. 67) zwei Punkte S_1 und S_2 ausfindig zu machen, die als Aufhängepunkt benützt, dem Pendel dieselbe Schwingungsdauer geben, so geben sie uns die Länge eines mathematischen Pendels von gleicher Schwingungsdauer an. Da sich also die Schwingungsdauer desselben nicht ändert, wenn die beiden Punkte S_1 und S_2 ihre Rolle vertauschen, so bezeichnet man es als Reversionspendel. Statt an dem Stabe zwei verschiebbare Kanten S_1 und S_2 anzubringen, hat zuerst (1818) Kapitän Kater an demselben zwei verschiebbare Gewichte g_1 und g_2 so eingestellt, bis für

die beiden festen Achsen S_1 und S_2 die Schwingungsdauer gleich groß wurde. Dann können alle Beobachtungen, die man an einem mathematischen Pendel machen sollte, mit einem solchen Reversionspendel ausgeführt werden, wenn man die Entfernung der Kanten als Pendellänge betrachtet.

Die Pendeluhr.

Das Pendel hat auch in culturhistorischer Hinsicht große Bedeutung, weil es wegen seiner unveränderlichen Schwingungsdauer in vorzüglicher Weise geeignet ist, die Genauigkeit der Zeitmessung außerordentlich zu steigern. Principiell erfüllt schon das Pendel allein alle an eine gut gehende Uhr gestellten Anforderungen; seine Verwendbarkeit muss nur noch in der Richtung erhöht werden, dass die Dämpfung seiner Schwingungen durch Reibung und Luftwiderstand verhindert wird. Ferner müssen die Pendelschwingungen mit einem Zählwerke in Verbindung stehen, welches die abgelaufenen Zeiteinheiten angibt, ohne den Gang des Pendels in seiner Genauigkeit zu beeinträchtigen.

Ineinandergreifende Zahnräder bewegen sich so, dass sich die Zeiten, welche sie zu einer Umdrehung brauchen, wie die Zahl der Zähne an ihrem Umfange verhalten. Dreht sich also ein Zahnrad bei jeder Schwingnng des Secundenpendels um den sechzigsten Theil seines Umfanges, so wird es sich in einer Minute einmal umdrehen. Durch mehrere Zahnradverbindungen kann endlich ein Rad so in Bewegung gesetzt werden, dass es sich 60 mal langsamer bewegt, und daher einen Zeiger in einer Stunde um einen vollen Winkel dreht.

Den Kernpunkt in der Erfindung der Uhr bildet die sogenannte Hemmung oder das Echappement. Mit dem sich um O drehenden Pendel (Fig. 68) ist ein Doppelhaken verbunden, bei dem die Bögen AA' und BB' von O aus beschriebene Kreisbögen sind. Wenn sich also ein Zahn des „Steigrades" an eines dieser beiden Bogenstücke anlegt, so übt er auf die Pendelbewegung weder einen hemmenden, noch einen beschleunigenden Einfluss aus, weil hiedurch nur ein Druck gegen das Achsenlager in O ausgeübt wird; auch wird der Zahn durch die Schwingung des Pendels von demselben weder vorwärts noch rückwärts geschoben. Das Pendel vermag daher den gleichförmig beschleunigten Gang des von einem Gewichte oder einer Stahlfeder getriebenen Zahnrades zu hemmen, ohne selbst durch einen Stoß des Rades in seinem Gange gestört zu werden. Die beiden Haken sind in A' und B' so abgeschnitten, dass die Linien $A' A''$ und $B' B''$ mit dem Wege des Zahnes einen sehr spitzen Winkel α einschließen, und der von der Kante bei A' oder B' stoßfrei abgleitende Zahn mit einer Componente seiner fortschreitenden Beschleunigung die Hemmung bei A oder B nach oben drängt, wenn das Pendel ohnehin schon in dieser Bewegung begriffen ist. Bei dieser Gelegenheit erhält das Pendel einen Ersatz für die durch Reibung erlittenen Verluste an lebendiger Kraft. Der gleichförmige Gang der Uhr kommt also dadurch zu Stande, dass der gleichförmig beschleunigte Gang des Zahnrades immer wieder nach genau gleichen Zeitintervallen unterbrochen wird; die Zeigerstellung gibt uns an, wie oft eine solche Unterbrechung stattgefunden und wie viele Schwingungen das Pendel von einem bestimmten Augenblicke an gemacht hat. Den „Gang der Uhr" kann man beschleunigen oder verzögern und somit regulieren, indem man den schwersten Theil des Pendels, die Pendellinse, mittels einer Schraube etwas höher oder tiefer einstellt und damit die reducierte Pendellänge verkürzt oder verlängert.

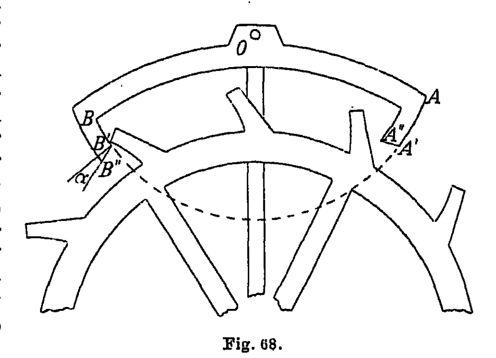


Fig. 68.

Bei den Taschenuhren wird die von der Schwerkraft hervorgerufene Pendelbewegung durch die Schwingungen der „Unruhe" ersetzt. Diese besteht aus einem

sehr leicht beweglichen Rade, welches durch eine Spiralfeder mit der Achse verbunde ist und bei jeder Schwingung um die Ruhelage einen Zahn des von einer Stahlfede getriebenen Steigrades freigibt.

Die Construction von Uhren, die mit Hilfe von Gewichten in Bewegung ve setzt werden, stammt schon aus der Zeit des Papstes Sylvester II. (gest. 1003), de selbst als deren Erfinder genannt wird. Ein arabischer Astronom Ibn Junis (gest. 1008 soll zuerst eine pendelartige Vorrichtung zur Regulierung eines Uhrwerkes benütz haben. Aber auch der Antheil, den der greise Galilei an dieser Erfindung genomme hat, war kein so durchschlagender, wie der des Niederländers Huygens, der zuers eine Pendeluhr in einer im Wesentlichen mit den jetzigen Uhren übereinstimmende Form im Jahre 1656 fertiggestellt und im Jahre 1658 in einem Werke „Horologium beschrieben hat; noch ausführlicher hat er im Jahre 1673 in seinem Werke „Horologiun oscillatorium" die Einrichtung der Pendeluhr theoretisch erörtert. Seither ist di Uhrenconstruction zu einem eigenen großen Industriezweige herangewachsen und de verschiedensten Aufgaben durch geeignete Verbesserungen angepasst worden.

Das Trägheitsmoment.

Der Punkt P bewege sich auf einem Kreise mit dem Radius $r = 1$ (Fig. 69) un erfahre eine gegen C gerichtete Beschleunigung, so oft wir ihn nach A oder B bringen Ist diese Beschleunigung gleich b', falls wir den Punkt I um den Bogen $x = 1$ von C entfernen, so besteht di Gleichung $b' = \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot 1$; führt also dieser Punkt um (Schwingungen aus, so ist $T = 2\pi \sqrt{\frac{1}{b'}}$. Bewegt sic aber die Masse m auf einem Kreise mit dem Radius r so wird sie bei derselben Drehung eine $r$mal größer Beschleunigung erfahren, und um dieselbe in Bewegung zu versetzen, muss die Kraft $m b' r$ in der Entfernung r vom Mittelpunkte angreifen und ein Drehmomen $D = m b' r^2$ entwickeln; es ist also:

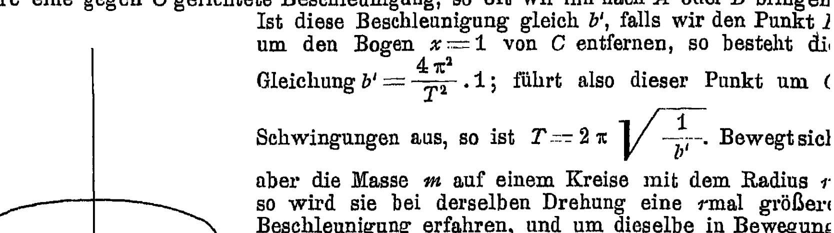


Fig. 69.

$$b' = \frac{D}{m r^2} \text{ und daher } T = 2\pi \sqrt{\frac{m r^2}{D}}.$$

Befinden sich die Massen $m_1, m_2, m_3, \ldots$ in den Entfernunger $r_1, r_2, r_3 \ldots$ vom Drehungsmittelpunkte, so bezeichnet man die Summe $m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + m_3 r_3^2 + \ldots = K$ als deren Trägheitsmoment. Ir diesem Falle ist die Schwingungsdauer $T = 2\pi \sqrt{\frac{K}{D}}$ und $K = \frac{T^2}{4\pi^2} \cdot D$

Aus der letzteren Formel ließe sich das Trägheitsmoment K durch Messung von T und D bestimmen. Wenn sich letztere Größe nicht direct ermitteln lässt, sc verfährt man, um z. B. das Trägheitsmoment eines Stabes AB (Fig. 70) zu finden, folgendermaßen. Wir hängen den Stab an einem elastischen Drahte auf und lassen ihn um die Achse OO' schwingen, in Bezug auf welche das Trägheitsmoment bestimmt werden soll. Die beobachtete Schwingungszahl sei $n = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D}{K}}$. Hierauf belasten wir den Stab mit einem Ringe von der Masse M mit dem Radius r, dessen Trägheitsmoment also $K' = M r^2$ ist. Der Stab habe sammt dem Ringe das Trägheitsmoment $K + K'$ und die Schwingungszahl:

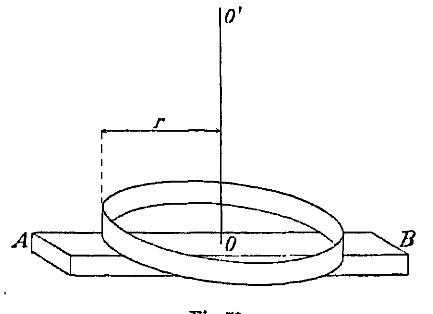


Fig. 70.

$n' = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D}{K + K'}}$. Aus beiden Gleichungen ergibt sich $\frac{K + K'}{K} = \frac{n^2}{n'^2}$, also ist:

$$K = \frac{n'^2}{n^2 - n'^2} K' = \frac{n'^2}{n^2 - n'^2} M r^2.$$

Diese Bestimmung des Trägheitsmomentes setzt voraus, dass die Drehungsachse durch den Schwerpunkt des Körpers hindurchgehe.

Rotiert ein Körper um eine Achse OO', die nicht durch den Schwerpunkt geht, wie es die Fig. 71 zeigt, so führt der Körper gleichzeitig eine Rotation um seinen Schwerpunkt aus. Während sich dieser um die eigentliche Rotationsachse OO' dreht, entwickelt er ein Trägheitsmoment K, welches sich nach der Formel $K = Ma^2$ berechnen lässt, wenn a der Abstand des Schwerpunktes vom Drehungsmittelpunkt ist. Das Trägheitsmoment eines Körpers bezüglich einer um a cm von seinem Schwerpunkt entfernten Achse, ist also

$$K' = Ma^2 + K''$$

wenn K'' das Trägheitsmoment bedeutet, welches sich auf eine zu OO' parallele Achse durch den Schwerpunkt bezieht.

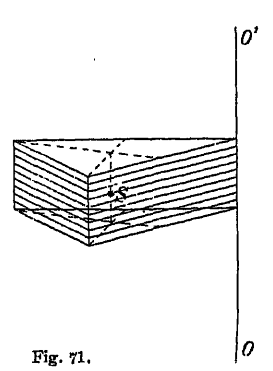


Fig. 71.

Das Trägheitsmoment wächst, wenn sich der Schwerpunkt von der Achse entfernt, und eine derartige Verschiebung streben die Massen jedes rotierenden Körpers vermöge der Fliehkraft an. Die Achse eines rasch rotierenden Rades, dessen Schwerpunkt nicht genau in die Rotationsachse fällt, wird daher gegen die Achsenlager fortwährend einen Druck ausüben und dieselben in eine schwingende Bewegung hineinziehen.

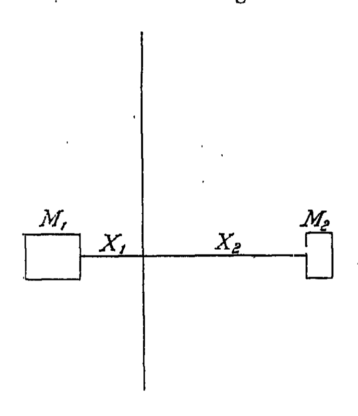


Fig. 72.

Dies geschieht aber auch, wenn zwar der Schwerpunkt in der Drehungsachse liegt, aber wegen der unsymmetrischen Massenvertheilung das Trägheitsmoment doch nicht nach allen Richtungen gleich groß ist. Zwei Massen M_1 und M_2 (Fig. 72) haben ihren Schwerpunkt in der Achse, wenn für ihre Entfernungen x_1 und x_2 von derselben die Gleichung besteht $M_1 x_1 = M_2 x_2$. Dagegen ist das Trägheitsmoment für beide Massen nur dann gleich, wenn $M_1 x_1^2 = M_2 x_2^2$; aus beiden Gleichungen folgt aber $x_1 = x_2$ und $M_1 = M_2$.

Damit bei einem rotierenden Körper die Achse gegen ihre Lager infolge der Rotation keinen seitlichen Druck ausübe, müssen die Massen desselben nach allen Richtungen symmetrisch um die Achse vertheilt sein. In diesem Falle brauchen die Achsenlager eines rotierenden Körpers, z. B. eines Schwungrades oder einer Turbine nur das Gewicht des Rades zu tragen, weil sich die Gleichgewichtsverhältnisse infolge der Rotation nicht ändern. Eine solche Achse nennt man eine freie Achse, da sie während der Rotation nicht erst durch die äußere Führung in ihrer Stellung festgehalten werden muss und dabei durch die Achsenlager keinen Zwang erfährt.

Die Kreiselbewegung.

Die Kreiselbewegung ist für die Mechanik darum von Wichtigkeit, weil bei derselben einige Eigenthümlichkeiten der drehenden Bewegung zum Vorschein kommen, die auf den ersten Blick überraschen und doch für das Verständnis der Erdbewegung und anderer Erscheinungen von wesentlicher Bedeutung sind.

Unter einem Kreisel versteht man einen Körper, dessen Massen um eine Achse vollkommen symmetrisch vertheilt sind.

Versetzt man einen Kreisel in sehr rasche Rotation um seine Symmetrieachse, so fällt er nicht um, wenn man ihn auch in schiefer Stellung mit dem einen Achsenende auf eine horizontale Ebene stellt. Seine Achse beschreibt vielmehr die Mantelfläche eines Kegels, dessen Spitze mit dem unteren Achsenende zusammenfällt, und zwar von oben betrachtet im selben Sinne, in der die Drehung des Kreisels erfolgt. Bei dieser Bewegung kommen drei Drehungen in Betracht, die wir uns durch Vectoren darstellen wollen. Der Rotation des Kreisels um seine Achse entspricht (Fig. 73) der Vector OA. Die Drehung, welche die Schwerkraft der Kreiselachse geben würde, wenn sie ihn umstürzt, stellen wir durch den Vector OB dar; er liegt in der Horizontalebene und ist so gewählt, dass der umfallende Kreisel von B aus gesehen ebenfalls eine Drehung im positiven Sinne macht. Der Vector OB führt, mit dem Vector OA zusammengesetzt, zu einem resultierenden Vector OA', der in die Ebene OAB fällt. Während die Rotation um die Kreiselachse als gleichförmige Bewegung durch die Trägheit der Massen aufrecht erhalten wird, bewirkt die zweite Bewegungscomponente, die von der Schwerkraft ausgeht, eine beschleunigte Bewegung. Wie beim horizontalen Wurfe die beschleunigte Bewegung des freien Falles mit der gleichförmigen in horizontaler Richtung sich zu der immer steileren Wurfbahn zusammensetzt, so wird auch beim Kreisel der Vector OB immer mehr zur Geltung kommen und das freie Ende der Kreiselachse A bei der Drehung um die Gerade OO' einen Kreis mit dem Mittelpunkt O' beschreiben, in welchem es sich mit immer größerer Geschwindigkeit im Sinne AA' fortbewegt.

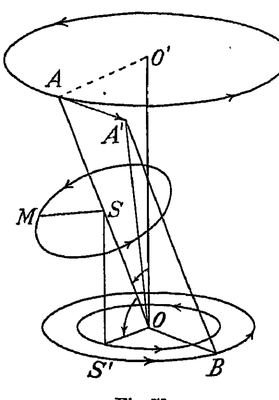


Fig. 73.

Die Schwerkraft, welche demnach den ruhenden Kreisel umstürzen würde, veranlasst den rotierenden Kreisel, der Fallbewegung unter dem rechten Winkel OAA' auszuweichen, und dieses Vorrücken der Achse senkrecht zur Neigungsebene $OO'A$ bezeichnet man als **Präcession**.

Dass die Schwerkraft die Ursache der Präcessionsbewegung sei, davon kann man sich mit Hilfe eines „Gyroskopes" (Fig. 74) überzeugen. Stellt man bei demselben das Gegengewicht G so ein, dass es dem Kreisel das Gleichgewicht hält, so unterbleibt die Präcessionsbewegung. Wenn dagegen der ruhende Kreisel sinken würde, so dreht sich die Kreiselachse von oben gesehen im selben Sinne wie der rotierende Kreisel von A aus betrachtet. Stellen wir dagegen das Gegengewicht so ein, dass sich der Kreisel von der horizontalen Stellung aus zu heben sucht, so erfolgt die Präcessionsbewegung im entgegengesetzten Drehungssinne.

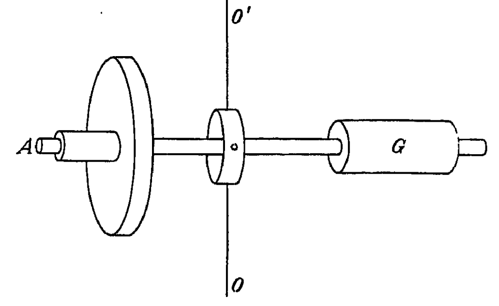


Fig. 74.

Um den Kreisel um seine Achse in drehende Bewegung zu versetzen oder ihn daran zu verhindern, muss zuerst seine kinetische Trägheit überwunden werden. Ebenso bedarf es einer gewissen Kraft, um der Achse eines rotierenden Kreisels eine andere Richtung zu geben oder die schon eingetretene Präcessionsbewegung zu verhindern. Ist also eine solche Kraft

ıicht vorhanden, so behält der Kreisel seine Achsenstellung bei. Wenn man daher nit dem rotierenden Gyroskope bei horizontaler Achsenstellung im Kreise herumgeht, ıo weist die Achse wie eine Magnetnadel immer nach derselben Richtung, falls die Reibung um die verticale Achse hinreichend klein ist.

Stellen wir die Achse OO' parallel zur Erdachse, so würde sich die Kreiselıchse AG in einer auf OO' senkrechten Ebene in 24 Stunden einmal von Osten nach Westen herumdrehen, wenn die Rotation des Kreisels so lange anhält.

Am rotierenden Kreisel tritt oft noch eine andere charakteristische Erscheinung ıuf, die man als Nutation bezeichnet. Betrachten wir zunächst die Bewegungen, welche die verschiedenen Punkte eines rollenden Rades ausführen. Die Curven, die von den einzelnen Punkten beschrieben werden, haben viererlei Gestalt und sind in Fig. 75 mit verschieden ausgezogenen Linien dargestellt. Die einfachste Linie beschreibt

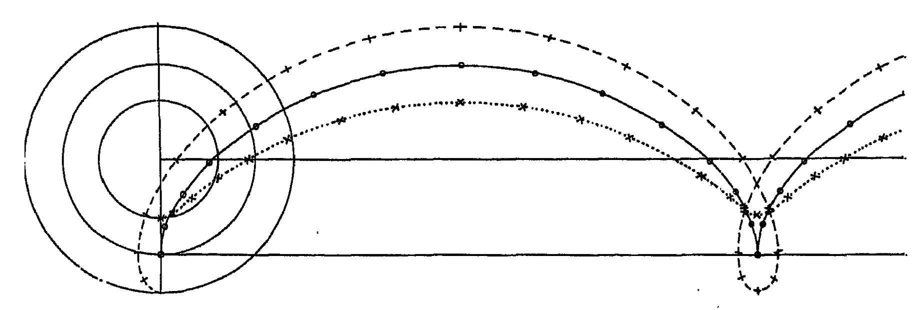


Fig. 75.

ler Mittelpunkt des Kreises, nämlich eine Gerade, welche mit der Strecke, über die ler Kreis rollt, in einer Entfernung von der Länge des Radius parallel läuft. Die ;weite Art von Linien beschreibt jeder Punkt auf der Peripherie des rollenden Kreises. Sie besteht aus einer Reihe von Bögen mit nach unten gerichteten Spitzen und wird wie die folgenden Linienformen als Cykloide oder Radlinie bezeichnet.

Eine davon verschiedene Form besitzt die dritte Curve, welche ein zwischen dem Mittelpunkt und der Peripherie liegender Punkt beschreibt. Die bei der früheren Curve ıach unten gerichteten Spitzen sind abgerundet, aber die Krümmung ist hier doch noch schärfer, als in den nach oben sich erhebenden Bögen. Man nennt sie in dieser Gestalt ıuch Schlangenlinie. Ein außerhalb der Kreisperipherie auf dem Radius liegender Punkt beschreibt endlich eine mit Schlingen versehene Curve. In jeder dieser Curven entsprechen die hervorgehobenen Punkte gleichen Zeitintervallen und geben lurch ihre Entfernungen die Geschwindigkeit an, mit der diese Bahnen von dem ıetreffenden Punkte zurückgelegt werden, wenn der Mittelpunkt mit gleichförmiger Geschwindigkeit weiterrollt.

Denken wir uns um den Punkt O (Fig. 76), auf dem das untere Achsenende les Kreisels ruht, eine Kugel beschrieben, so wird die Spitze A des schief stehenden Kreisels infolge der Präcession auf der Oberfläche der Kugel einen zur Horizontalebene parallelen Kreis KK beschreiben. Den Punkt A, welcher diesen Kreis auf der Kugel

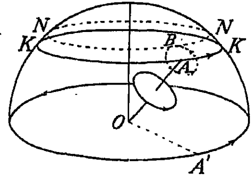


Fig. 76.

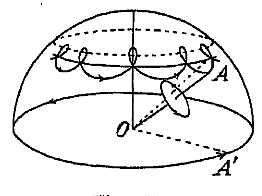


Fig. 77.

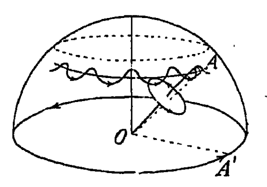


Fig. 78.

ıeschreibt, können wir als den Mittelpunkt eines Rades auffassen, das über einen ınderen Parallelkreis NN in der Oberfläche der Kugel fortrollt. Wenn wir den Kreisel ın einem nicht in der Achse liegenden Punkte berühren oder der Achse einen seitlichen Stoß geben, so setzt sich diese neue Bewegung mit der früheren Drehung zu einer Rotation um eine neue Achse zusammen, die mit der geometrischen nicht mehr

zusammenfällt, und dann ist der Punkt A nicht mehr Mittelpunkt des rollenden Rades und wird daher eine Schlingen- oder Schlangenlinie beschreiben (Fig. 77 und 78). Dieses stoßweise und zugleich mit Hebungen und Senkungen verbundene, „nickende" Vorwärtsschreiten der Achsenspitze A bezeichnet man daher als „Nutation".

Die Präcession und Nutation sind besonders für die Astronomie von großer Wichtigkeit. Die Drehung der Erde um ihre eigene Achse ist zunächst der Grund ihrer constanten Achsenstellung, infolge deren sie der Sonne bald die nördliche, bald die südliche Hemisphäre zuwendet und so den Wechsel der Jahreszeiten herbeiführt. Da ferner um den Äquator herum mehr Massen gelagert sind als dies bei vollkommen kugelförmiger Gestalt der Fall wäre, so werden die der Sonne zugewendeten Äquatorialgebiete wegen der geringeren Entfernung von derselben stärker angezogen als die auf der entgegengesetzten Seite (Fig. 79). Daher wirkt die Gravitation auf die Erde im

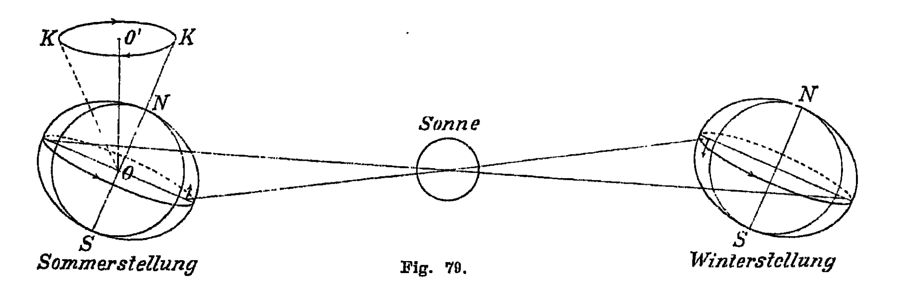


Fig. 79.

Sommer und Winter in dem Sinne ein, dass sie die Erdachse aufzustellen sucht. Infolge der Rotation tritt aber die Präcessionserscheinung und zwar in der Weise auf, dass die Erdachse SN die Mantelfläche eines Kegels mit der Achse OO' beschreibt, weshalb ihre Süd-Nord-Richtung nicht immer nach dem jetzigen Polarstern gerichtet bleibt. Der Nordpol wird vielmehr im Verlaufe von etwa 26000 Jahren am Himmel einen großen Kreis KK beschreiben. Die Präcessionserscheinung der Erde ist noch von einer Nutationsbewegung begleitet. Die Schlangenlinie, welche dabei der Nordpol am Himmelsgewölbe beschreibt, braucht zu einem Bogen fast 19 Jahre und entfernt sich etwa 9" nach oben und unten von der Bahn des Mittelpunktes des rollenden Kreises. Das Vorrücken des Nordpols und die damit zusammenhängende Bewegung des Frühlingspunktes ist daher keine gleichförmige, sondern bald beschleunigt, bald verzögert.

Die Erhaltung der Arbeit.

Während in der Chemie schon zu Beginn des 19. Jahrhunderts die wissenschaftliche Überzeugung zum Durchbruche kam, dass das scheinbare Verschwinden mancher Körper nur ein Übergang in eine andere Erscheinungsform sei, dass aber bei keinem chemischen Processe weder Masse verloren gehe noch gewonnen werden könne, entwickelte sich die analoge Anschauung über die Erhaltung der Arbeitsleistung erst in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts zu voller Klarheit. Man sprach zuerst von einer Erhaltung der „Kraft", dann von der Erhaltung der „Energie", und mit letzterer deckt sich der Begriff Arbeit. Angebahnt wurde dieser Gedanke durch die unzähligen, misslungenen Versuche, ein sogenanntes „Perpetuum mobile", also eine Vorrichtung zu ersinnen, die sich ohne äußere Arbeitszufuhr immerfort bewegt. Wenn es eine Bewegung ohne Reibung und ohne Widerstand des Mittels gäbe, so wäre jedes schwingende Pendel und jeder rotierende Kreisel ein Perpetuum mobile. Da aber diese beiden Bewegungshindernisse mit einer fortwährenden Arbeitsleistung verbunden sind, welche die lebendige Kraft bald aufzehrt, so enthält die Absicht, ein Perpetuum mobile zu erfinden, das Bestreben, einen Apparat herzustellen, der fortwährend Arbeit leistet, ohne hinreichende Arbeitsmengen zu besitzen oder sie anderswoher zu empfangen.

Wie die Alchemie mit dem vergeblichen Versuche „Gold zu machen" untergieng und dann die wissenschaftliche Chemie erstand, sobald man die Erhaltung der Masse als ersten Grundsatz hinstellte, so führte die Erkenntnis von der „Unmöglichkeit eines Perpetuum mobile" zur Aufstellung des Principes von der „Erhaltung der Arbeit".

Die Anwendung dieses Grundsatzes erwies sich nicht nur für die Mechanik, sondern für die ganze Physik, insbesonders für die Wärmelehre und Elektricitätslehre, als außerordentlich wichtig und fruchtbringend. Während wir uns in der Chemie nur mehr mit dem Austausche von Elementen und deren Verbindungen befassen, erblicken wir in der Physik nur mehr verschiedene Arbeitsformen, die zueinander in verschiedene Wechselbeziehungen treten, ohne sich dabei zu vermehren oder zu vermindern.

Für die Mechanik ist der Grundsatz der Erhaltung der Arbeit schon im Trägheitsprincip enthalten, und damit greift diese Auffassung auf die Zeiten Newtons zurück. Am deutlichsten zeigt sich das lebensvolle Ringen nach dieser Erkenntnis in den wissenschaftlichen Arbeiten des Heilbronner Arztes Julius Robert Mayer.

Um einem Körper eine gewisse Geschwindigkeit zu ertheilen, muss eine Kraft, wenn auch noch so kurze Zeit, auf ihn wirken, während welcher derselbe bereits eine Strecke Weges zurücklegt. Ist die Endgeschwindigkeit gleich v, so ist die hiebei aufgewendete Arbeit $^1/_2 m v^2$, und mit dieser Geschwindigkeit bewegt sich der Körper in gerader Linie fort, bis er auf einen anderen Körper trifft, auf den er seine lebendige Kraft übertragen kann. Kommt er dadurch selbst zur Ruhe, so hat er offenbar ebensoviel Arbeit abgegeben, als er früher aufgenommen hat, um die Geschwindigkeit v anzunehmen. Der in Bewegung befindliche Körper erscheint uns also als Träger der Arbeitsmenge $^1/_2 m v^2$, welche man daher als „kinetische“ oder als „Bewegungsenergie“ bezeichnet. Die Überwindung der kinetischen Trägheit eines Körpers bei Geschwindigkeitsänderungen ist also der allgemeinste und fundamentalste Fall der Arbeitsaufspeicherung; daher war die Aufstellung des Trägheitsprincipes die erste Formulierung des Principes der „Erhaltung der Arbeit“.

Wenn wir ein Kilogramm einen Meter hoch heben, so wenden wir eine Arbeit von $9{\cdot}81.10^7$ Erg auf. Da diese Arbeit nur in der veränderten Lage und nicht wie früher in der veränderten Geschwindigkeit zum Ausdrucke kommt, so spricht man in diesem Falle von einer „Energie der Lage“. Um den Körper zu heben, mussten wir die Schwerkraft längs einer bestimmten Strecke überwinden; fällt der Körper wieder zu Boden, so erstattet uns die Schwerkraft die aufgewendete Arbeit zurück. Die Erhaltung der Arbeit zeigt sich also im Wirken der Schwerkraft, indem letztere Arbeit consumiert, wenn wir die Massen im entgegengesetzten Sinne ihrer Beschleunigung verschieben, und Arbeit liefert, wenn wir ihrem Wirken kein Hindernis entgegensetzen.

Spannen wir durch unsere Muskelkraft den Pfeilbogen, so leisten wir dabei eine Arbeit, die im gespannten Bogen aufgespeichert wird. Drücken wir den Bogen los, so versetzt zuerst die elastische Kraft des Bogens die Schnur und diese dann den Pfeil in Bewegung. Die Erhaltung der Arbeit besteht also auch für jene Kräfte, die weder aus der kinetischen Trägheit der Materie, noch aus der Gravitation hervorgehen.

Elasticität und Festigkeit.

Spannen wir eine stählerne Stricknadel in einem Schraubstocke fest, so lässt sich deren freie Spitze aus ihrer Ruhelage verschieben, ohne dass die Nadel deshalb bricht. Wenn wir dann die Nadel loslassen, so führt sie um ihre ursprüngliche Ruhelage Schwingungen aus wie ein Pendel, aber in diesem Falle ist es nicht die Schwerkraft, welche die Nadeltheilchen gegen die Ruhelage hinzieht, sondern es sind Kräfte, die sich auch noch an den kleinsten Stücken des Stahles nachweisen lassen, und die wir daher als Molecularkräfte bezeichnen.

Körper, welche sofort ihre ursprüngliche Gestalt anzunehmen suchen, sobald eine äußere Kraft, die ihre Gestalt verändert hat, zu wirken aufhört,

nennen wir „elastisch“ und die in den Molecularkräften liegende Ursache dieser Erscheinung „Elasticität“.

Wir dürfen aber die im Schraubstocke eingespannte Nadel nicht beliebig stark biegen, wenn von dieser Biegung nicht eine Krümmung zurückbleiben oder wohl gar der Zusammenhang zwischen den Theilchen aufhören soll, falls die Nadel bricht. Dies geschieht, wenn die auf die Nadel wirkende Kraft ihre Festigkeitsgrenze überschreitet.

Unter Festigkeit verstehen wir das größte Kraftmaß, dem ein Körper zu widerstehen vermag, ohne dass sein Zusammenhang unterbrochen wird.

Die Festigkeit hängt nicht nur von den Molecularkräften, sondern auch von den Dimensionen und von der Gestalt des Körpers ab. Manche Körper haben eine verschiedene Festigkeit, je nachdem sie nach verschiedenen Richtungen hin in Anspruch genommen werden; so hat z. B. das Tannenholz eine viel größere Festigkeit in der Richtung der Fasern als senkrecht zu denselben. Die Festigkeitslehre ist außerordentlich wichtig für die contructive Mechanik, da von der Festigkeit vielfach auch die Dauerhaftigkeit der Constructionen abhängt.

Wenn wir einen Stab von der Länge a am einen Ende A befestigen, am anderen Ende B eine Kraft P im Sinne einer Verlängerung auf ihn wirken lassen, so erfahre er eine Verlängerung um die Strecke $BB' = a'$, und man bezeichnet den Wert $\lambda = a' : a$ als Dehnung oder Dilatation (Fig. 80).

Wenn wir von der Voraussetzung ausgehen, dass sich zwei getrennte Stäbe von gleichem Querschnitt genau so verhalten, wie ein einziger mit dem doppelten Querschnitt, so können wir die Wirkung der Belastung verschieden dicker Stäbe dadurch auf einander beziehen, dass wir die Beanspruchung nach dem Quotienten aus der Gesammtbelastung und dem Querschnitt bemessen. Diesen Quotient p bezeichnen wir als Zug. Der Wert desselben wird in der Praxis nicht nach Dyn und cm^2 bemessen, sondern auf Kilogrammgewichte und mm^2 bezogen.

Fig. 80.

Unter Zugfestigkeit verstehen wir den größten Zug, den man anwenden kann, ohne dass dadurch der Körper zerrissen wird.

Wie die Zugstärke wird auch die Zugfestigkeit in den genannten Einheiten ausgedrückt. So ist z. B. die Zugfestigkeit für Stahl 80, Eisen und Messing 60, für Kupfer 40, Silber 29, Zink 13 und für Blei 2, d. h. man muss an einen Stahldraht von 1 mm^2 Querschnitt mehr als 80 kg anhängen, damit derselbe reißt, während bei einem ebenso dicken Bleidraht schon 2 kg genügen.

Da bei verschiedenen Körpern dieselbe Zugkraft verschiedene Dilatationen herbeiführt, so lässt sich diese Verschiedenheit durch eine Zahl ε ausdrücken, welche nach der Formel $\lambda = \varepsilon p$ die Dehnung zu berechnen gestattet; den Coëfficienten ε bezeichnet man als den Elasticitätscoëfficienten. Um dagegen die zu einer bestimmten Dilatation nöthige Zugkraft zu berechnen, kann man sich der Formel bedienen:

$$p = \frac{1}{\varepsilon} \lambda = E . \lambda$$

Den Coëfficient $1 : \varepsilon = E$ nennt man Elasticitätsmodul.

Wenn man in der Formel $\lambda = \varepsilon p$ den Wert von $p = 1$ setzt, also einen Stab von 1 mm^2 Querschnitt einem Zuge von 1 kg aussetzt, so erhalten wir $\lambda = \varepsilon$; daher sagt man auch: unter dem Elasticitätscoëfficienten versteht man die Zahl, welche angibt, welches Verlängerungsverhältnis λ durch den Zug von 1 kg pro mm^2 erreicht wird. Andererseits wird der Elasticitätsmodul E auch damit definiert, dass man die Gleichung $p = E\lambda$ auf den Wert $\lambda = 1$ bezieht und sagt, der Elasticitätsmodul E gibt die Kraft an, welche zur Verlängerung des Stabes um seine eigene Länge nothwendig wäre, wenn eine solche Verlängerung noch innerhalb der Elasticitätsgrenzen fallen würde. Legen wir einen Stab AB (Fig. 81) auf zwei parallele Kanten

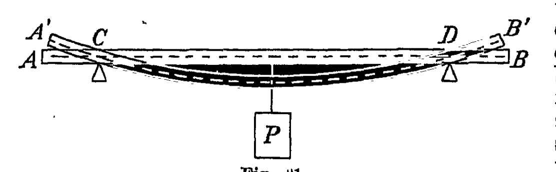


Fig. 81.

C und D und belasten wir den Mittelpunkt mit einem Gewichte P, so werden bei der Biegung die obersten Schichten des Stabes zusammengedrückt, während die unteren eine Zerrung erfahren. In der Mitte muss es daher eine Schichte geben, die durch die Biegung weder gedehnt noch verkürzt wird, und diese bezeichnet man als die neutrale Faser. Die von der Länge, vom Querschnitte und Materiale des Stabes abhängige Verschiebung entspricht seiner Biegungselasticität, und deren Grenze gibt die Biegungsfestigkeit an.

Wenn wir (Fig. 82) das eine Ende des Stabes um dessen Längsachse drehen, während wir das andere festhalten, so zeigt sich abermals eine Kraftwirkung, welche der Drehung Widerstand leistet, und diese führt man auf die Torsionselasticität zurück, deren Grenze wir als die Torsionsfestigkeit bezeichnen.

Im analogen Sinne spricht man auch von Druckelasticität und Druckfestigkeit.

Schließlich kann man noch den Gegendruck, welcher sich bei einer Volumsveränderung einstellt, als eine Elasticitätswirkung auffassen und durch einen Coefficienten zum Ausdrucke bringen.

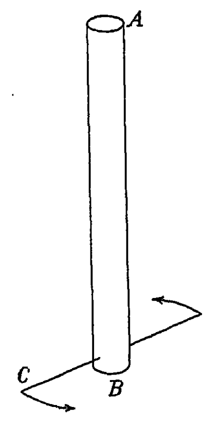


Fig. 82.

Der Stoß.

Zwei Kugeln A und B (Fig. 83), welche sich auf der gemeinsamen Bahn MN bewegen, besitzen die Massen m_1 und m_2; vor dem Stoße seien ihre Geschwindigkeiten v_1 und v_2 und nach dem Stoße c_1 und c_2; die Zeit, während welcher die Geschwindigkeitsänderung erfolgt, sei t.

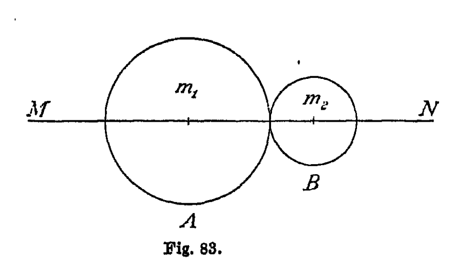


Fig. 83.

Dann stellen die Ausdrücke $\frac{c_1-v_1}{t}$ und $\frac{c_2-v_2}{t}$ die beim Stoße eintretende Beschleunigung, beziehungsweise Verzögerung dar und $m_1\frac{c_1-v_1}{t}$ und $m_2\frac{c_2-v_2}{t_2}$ die Kräfte, die dabei ausgeübt werden. Wenn andere Kräfte ausgeschlossen sind, so müssen die eben berechneten Kräfte nach dem dritten Newton'schen Gesetze dem Werte nach gleich, aber dem Sinne nach entgegengesetzt, und daher ihre algebraische Summe gleich Null sein; es besteht daher die Gleichung $m_1\frac{c_1-v_1}{t}+m_2\frac{c_2-v_2}{t}=o$ und daher auch $m_1 c_1 - m_1 v_1 = m_2 v_2 - m_2 c_2$ oder $m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 c_1 + m_2 c_2$.

Bezeichnen wir das Product aus der Masse und der Geschwindigkeit, mit der sie sich bewegt, als Bewegungsgröße, so können wir den daraus sich ergebenden Satz mit folgenden Worten aussprechen:

Bei einem Stoße auf geradliniger Bahn ändern sich die Geschwindigkeiten so, dass die Summe der Bewegungsgrößen beider Körper nach dem Stoße dieselbe ist, wie vor dem Stoße.

Fig. 84.

Diese Gleichung lässt sich mechanisch noch in anderer Weise deuten (Fig. 84). Es sei O ein Punkt auf der geradlinigen Bahn, in welcher die ganze

Stoßbewegung verläuft, und l_1 und l_2 seine Entfernungen von den Massen m_1 und m_2. Wir können für beide Massen, wo immer sie sich im Verlaufe ihrer Bewegungen befinden, den Schwerpunkt ermitteln, indem wir sagen: das Drehmoment der im Schwerpunkte S vereinigten Massen $m_1 + m_2$ muss in Bezug auf irgend einen Punkt O gleich sein der Summe der Drehmomente der einzelnen Massen.

Es ist dann $g\,(m_1 + m_2)\,l = g m_1 l_1 + g m_2 l_2$, also $l = \dfrac{m_1 l_1 + m_2 l_2}{m_1 + m_2}$.

Wenn sich die Massen m_1 und m_2 auf der Geraden mit den Geschwindigkeiten v_1 und v_2 bewegen, so wird im allgemeinen auch der Schwerpunkt mit einer Geschwindigkeit v verschoben, und es ist

$$v = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}.$$

Bezeichnen wir $(m_1 + m_2)\,v$ als die Bewegungsgröße des Schwerpunktes, so können wir die Gleichung: $(m_1 + m_2)\,v = m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 c_1 + m_2 c_2$ mit den Worten aussprechen: die Bewegungsgröße des Schwerpunktes der zusammenstoßenden Massen ändert sich infolge des Stoßes nicht.

Die beiden Massen können sich während des Stoßes verschieden verhalten. Die Kraft, welche beim Stoße die eine Kugel auf die andere ausübt, kann entweder zu einer Deformation ihrer Gestalt führen, die der Körper vermöge seiner Elasticität alsbald aufhebt oder die Deformation bleibt bestehen und wird nicht wieder in kinetische Energie verwandelt. Wenn sich ein Körper jeder Gestaltsveränderung gegenüber vollkommen passiv verhält, so nennt man ihn „plastisch".

Ist aber der gestoßene Körper „elastisch", so wirft er den stoßenden Körper, sobald seine lebendige Kraft bei der eintretenden Deformation erschöpft ist, zurück, und dieser verlässt die Oberfläche des elastischen Körpers mit derselben Geschwindigkeit, mit der er sie zu Beginn des Stoßes berührt hat. Dass auch mit dem elastischen Stoße eine Deformation verbunden ist, kann man bei einer Elfenbeinkugel dadurch zeigen, indem man die Kugel gegen eine mit Ruß überzogene Steinplatte stoßen lässt und dann beobachtet, wie groß die gestoßene Stelle ist und wie bei immer stärkeren Stößen die Berührungsstelle an Umfang zunimmt.

In Wirklichkeit gibt es weder vollkommen elastische noch vollkommen unelastische Körper, aber annähernd kann man z. B. Elfenbeinkugeln als elastisch und feuchten Töpferthon als plastisch oder unelastisch betrachten.

Der unelastische Stoß. Stoßen zwei unelastische Körper zusammen, so bleiben dieselben nach dem Stoße bei einander und setzen ihren Weg mit gemeinsamer Geschwindigkeit fort. Sind die Geschwindigkeiten vor dem Stoße v_1 und v_2 und nach demselben $c_1 = c_2 = c$, so folgt aus der Gleichung

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 c_1 + m_2 c_2 = (m_1 + m_2)\,c,$$

dass die gemeinsame Geschwindigkeit nach dem Stoße $c = \dfrac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$

Vergleichen wir die lebendige Kraft der vereinigten Massen mit derjenigen der einzelnen Massen vor dem Stoße, so ergibt sich, dass beim unelastischen Stoße ein Theil der früheren lebendigen Kraft für die kinetische Energie verloren gegangen ist.

Die Differenz beider Arbeitsmengen ist nämlich

$$\left(\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2}\right) - \frac{1}{2}\cdot(m_1 + m_2).c_2 = \left(\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2}\right) - \frac{1}{2}(m_1 + m_2)\cdot\left(\frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}\right)^2$$

$$= \frac{1}{2}\,\frac{1}{m_1 + m_2}\left[\left(m_1^2 v_1^2 + m_1 m_2 v_1^2 + m_1 m_2 v_2^2 + m_2^2 v_2^2\right) - \left(m_1^2 v_1^2 + 2\,m_1 m_2 v_1 v_2 + m_2^2 v_2^2\right)\right]$$

$$= \frac{m_1 m_2}{2(m_1 + m_2)}(v_1 - v_2)^2 = \frac{m_1}{\dfrac{m_1}{m_2} + 1}\;\frac{(v_1 - v_2)^2}{2}$$

Betrachten wir den letzteren Ausdruck, so sehen wir, dass in demselben wieder das halbe Quadrat einer Geschwindigkeit auftritt, multipliciert mit der Masse m_1, und dividiert durch die Zahl $\dfrac{m_1}{m_2} + 1$, die größer ist als 1. Sind die beiden Massen

Stoßbewegung verläuft, und l_1 und l_2 seine Entfernungen von den Massen m_1 und m_2. Wir können für beide Massen, wo immer sie sich im Verlaufe ihrer Bewegungen befinden, den Schwerpunkt ermitteln, indem wir sagen: das Drehmoment der im Schwerpunkte S vereinigten Massen $m_1 + m_2$ muss in Bezug auf irgend einen Punkt O gleich sein der Summe der Drehmomente der einzelnen Massen.

Es ist dann $g\,(m_1 + m_2)\,l = g m_1 l_1 + g m_2 l_2$, also $l = \frac{m_1 l_1 + m_2 l_2}{m_1 + m_2}$.

Wenn sich die Massen m_1 und m_2 auf der Geraden mit den Geschwindigkeiten v_1 und v_2 bewegen, so wird im allgemeinen auch der Schwerpunkt mit einer Geschwindigkeit v verschoben, und es ist

$$v = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}.$$

Bezeichnen wir $(m_1 + m_2)\,v$ als die Bewegungsgröße des Schwerpunktes, so können wir die Gleichung: $(m_1 + m_2)\,v = m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 c_1 + m_2 c_2$ mit den Worten aussprechen: die Bewegungsgröße des Schwerpunktes der zusammenstoßenden Massen ändert sich infolge des Stoßes nicht.

Die beiden Massen können sich während des Stoßes verschieden verhalten. Die Kraft, welche beim Stoße die eine Kugel auf die andere ausübt, kann entweder zu einer Deformation ihrer Gestalt führen, die der Körper vermöge seiner Elasticität alsbald aufhebt oder die Deformation bleibt bestehen und wird nicht wieder in kinetische Energie verwandelt. Wenn sich ein Körper jeder Gestaltsveränderung gegenüber vollkommen passiv verhält, so nennt man ihn „plastisch".

Ist aber der gestoßene Körper „elastisch", so wirft er den stoßenden Körper, sobald seine lebendige Kraft bei der eintretenden Deformation erschöpft ist, zurück, und dieser verlässt die Oberfläche des elastischen Körpers mit derselben Geschwindigkeit, mit der er sie zu Beginn des Stoßes berührt hat. Dass auch mit dem elastischen Stoße eine Deformation verbunden ist, kann man bei einer Elfenbeinkugel dadurch zeigen, indem man die Kugel gegen eine mit Ruß überzogene Steinplatte stoßen lässt und dann beobachtet, wie groß die gestoßene Stelle ist und wie bei immer stärkeren Stößen die Berührungsstelle an Umfang zunimmt.

In Wirklichkeit gibt es weder vollkommen elastische noch vollkommen unelastische Körper, aber annähernd kann man z. B. Elfenbeinkugeln als elastisch und feuchten Töpferthon als plastisch oder unelastisch betrachten.

Der unelastische Stoß. Stoßen zwei unelastische Körper zusammen, so bleiben dieselben nach dem Stoße bei einander und setzen ihren Weg mit gemeinsamer Geschwindigkeit fort. Sind die Geschwindigkeiten vor dem Stoße v_1 und v_2 und nach demselben $c_1 = c_2 = c$, so folgt aus der Gleichung

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 c_1 + m_2 c_2 = (m_1 + m_2)\,c,$$

dass die gemeinsame Geschwindigkeit nach dem Stoße $c = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$.

Vergleichen wir die lebendige Kraft der vereinigten Massen mit derjenigen der einzelnen Massen vor dem Stoße, so ergibt sich, dass beim unelastischen Stoße ein Theil der früheren lebendigen Kraft für die kinetische Energie verloren gegangen ist.

Die Differenz beider Arbeitsmengen ist nämlich

$$\left(\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2}\right) - \frac{1}{2}\cdot(m_1 + m_2)\,.\,c_2 = \left(\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2}\right) - \frac{1}{2}\,(m_1 + m_2)\left(\frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}\right)^2$$

$$= \frac{1}{2}\,\frac{1}{m_1 + m_2}\left[\left(m_1^2 v_1^2 + m_1 m_2 v_1^2 + m_1 m_2 v_2^2 + m_2^2 v_2^2\right) - \left(m_1^2 v_1^2 + 2\,m_1 m_2 v_1 v_2 + m_2^2 v_2^2\right)\right]$$

$$= \frac{m_1 m_2}{2\,(m_1 + m_2)}\,(v_1 - v_2)^2 = \frac{m_1}{\frac{m_1}{m_2} + 1}\;\frac{(v_1 - v_2)^2}{2}$$

Betrachten wir den letzteren Ausdruck, so sehen wir, dass in demselben wieder das halbe Quadrat einer Geschwindigkeit auftritt, multipliciert mit der Masse m_1, und dividiert durch die Zahl $\frac{m_1}{m_2} + 1$, die größer ist als 1. Sind die beiden Massen

gleich groß, also $m_1/m_2 = 1$ und die Geschwindigkeiten ebenfalls gleich groß aber entgegengesetzten Sinnes, so dass also $v_1 - v_2 = v_1 - (-v_1) = 2v_1$, dann ist der Verlustgleich $m_1 v_1^2 = 2(m_1 . v_1^2/2)$; mithin verliert jeder der beiden stoßenden Körper $^1/_2 m . v_1^2$ und es tritt in diesem Falle infolge des Stoßes vollständige Ruhe ein. Es wird daher die ganze in der Bewegung liegende Arbeit zur dauernden Deformation der Massen verwendet und durch dieselbe vollständig absorbiert.

Der elastische Stoß. Gehen wir nun zum zweiten Falle über, dass jeder der beiden Körper vom Augenblicke der stärksten Deformation angefangen den anderen Körper zurückschleudert, dann wird auch die zur Deformation verwendete Arbeit zurückerstattet und es kann daher ein Verlust an lebendiger Kraft überhaupt nicht eintreten. Aus der Gleichheit der lebendigen Kraft vor und nach dem Stoße ergibt sich also in diesem Falle eine zweite Gleichung, nämlich

$$^1/_2\, m_1 v_1^2 + {}^1/_2\, m_2 v_2^2 = {}^1/_2\, m_1 c_1^2 + {}^1/_2\, m_2 c_2^2,$$

und die zur Bestimmung beider Geschwindigkeiten nach dem Stoße dienenden Gleichungen lauten daher

$$m_1 c_1^2 + m_2 c_2^2 = m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2$$
$$m_1 c_1 + m_2 c_2 = m_1 v_1 + m_2 v_2$$

Daraus ergeben sich die Gleichungen

$$m_1 (c_1^2 - v_1^2) = m_2 (v_2^2 - c_2^2)$$
$$m_1 (c_1 - v_1) = m_2 (v_2 - c_2)$$

und durch Division derselben

$$c_1 + v_1 = v_2 + c_2$$

Wenn wir zu dieser mit m_2 multiplicierten Gleichung die unmittelbar vorausgehende addieren, so erhalten wir eine Gleichung zur Berechnung von c_1, und wenn wir von der mit m_1 multiplicierten Gleichung die vorausgehende Gleichung subtrahieren, so erhalten wir eine Gleichung für c_2; es ergibt sich dann also

$$c_1 = \frac{2 m_2 v_2 + v_1 (m_1 - m_2)}{m_1 + m_2} \qquad c_2 = \frac{2 m_1 v_1 - v_2 (m_1 - m_2)}{m_1 + m_2}$$

Die Discussion dieser beiden Ausdrücke führt zu folgenden wichtigen Specialfällen:

1. Eine elastische Kugel stößt gegen eine elastische Wand. Die Kugel mit der Masse m_1 hat vor dem Stoße die Geschwindigkeit v_1 und kehrt nach dem Stoße mit der Geschwindigkeit c_1 von der Wand zurück. Die Geschwindigkeit der Wand ist vor und nach dem Stoße gleich Null und die Masse der Kugel m_1 ist auch gegenüber der Masse m_2 der Wand verschwindend klein; aus

$$v_2 = o \text{ und } \frac{m_1}{m_2} = o \text{ folgt } c_1 = \frac{v_1 (m_1 - m_2)}{m_1 + m_2} = v_1 . \frac{\frac{m_1}{m_2} - 1}{\frac{m_1}{m_2} + 1} = -v_1$$

2. Eine elastische Kugel von der Masse m_1 stößt mit einer Geschwindigkeit v_1 gegen eine größere, ruhende, elastische Kugel von der Masse m_2. Sie prallt nach dem Stoße zurück, aber mit geringerer Geschwindigkeit. Die gestoßene Kugel bewegt sich im Sinne der Stoßrichtung weiter. Aus den Formeln ergibt sich ebenfalls wegen $v_2 = o$

$$c_1 = \frac{v_1 (m_1 - m_2)}{m_1 + m_2} = -v_1 \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1}, \text{ wobei } \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1} < 1 \text{ weil } m_2 > m_1$$

und $$c_2 = \frac{2 m_1 v_1}{m_1 + m_2}$$

3. Die beiden Kugeln haben gleiche Massen, die Geschwindigkeit der ersteren sei v_1, die zweite befinde sich in Ruhe. Dann kommt die stoßende Kugel durch den Stoß sofort zur Ruhe, die zweite setzt mit der Ge-

schwindigkeit der ersten die Bewegung fort; denn für $m_1 = m_2$ erhalten wir $c_1 = o$ und $c_2 = v_1$.

4. Ist die Masse der stoßenden Kugel m_1 größer als die ruhende zweite Kugel m_2, so sehen wir, wie sich im Gegensatz zum zweiten Falle die stoßende Kugel über die Stoßstelle hinaus bewegt.

Aus der Formel ergibt sich ebenfalls

$c_1 = \frac{(m_1 - m_2)}{m_1 + m_2} v_1$ und $c_2 = \frac{2 m_1}{m_1 + m_2} v_1$; beide Coefficienten von v_1 sind positiv, da $m_1 > m_2$.

Die gestoßene Kugel weicht also der stoßenden Kugel mit einer Geschwindigkeit aus, die sogar größer ist, als die der stoßenden, weil $2 m_1 > m_1 - m_2$; diese Geschwindigkeitssteigerung lässt sich nur durch die beim Stoße geweckten Molecularkräfte erklären.

Alle noch möglichen Fälle lassen sich auf die eben angeführten zurückführen. Von diesen sei nur der eine Fall hervorgehoben, wenn zwei elastische Kugeln mit gleicher Masse m und den Geschwindigkeiten v_1 und v_2 einander begegnen und dann einfach ihre Geschwindigkeiten austauschen, da unseren Formeln zufolge

$$c_1 = 2 v_2 m/(m + m) = v_2$$

$$\text{und } c_2 = 2 m v_1/(m + m) = v_1$$

In diesem Falle übernimmt also die zweite Kugel einfach die ganze lebendige Kraft der ersten und setzt daher deren Bewegung mit denselben mechanischen Verhältnissen fort.

Wenn, wie wir es bisher angenommen haben, die Bahnrichtung der einen Kugel durch den Mittelpunkt der anderen hindurchgeht, so sagt man, der Stoß sei ein centraler. In jedem anderen Falle spricht man von einem schiefen Stoße.

Letzterer gestaltet sich nicht nur darum viel complicierter, weil dann immer zwei verschiedene Componenten in Betracht gezogen werden müssen, sondern auch deshalb, weil dabei noch Drehungen um verschiedene Achsen hinzu kommen, die ebenfalls lebendige Kraft absorbieren.

Die eben besprochenen Erscheinungen sind nicht nur für die Mechanik fester Körper von großer Wichtigkeit, sondern wir werden auch noch in anderen Gebieten der Physik ähnlichen Erscheinungen begegnen, die nicht als bloße Analogien aufgefasst werden können. Vielmehr können wir dann annehmen, dass sie nur als die Folgen unzähliger Stoßcomplexe kleinerer Massen aufzufassen sind.

Hier begegnen wir auch das erstemal einem Fundamentalsatze der ganzen Physik, nämlich dem Reflexionsgesetze.

Stößt eine elastische Kugel gegen eine feste Wand, so prallt sie von dieser mit derselben Geschwindigkeit zurück, mit der sie sich ihr genähert hat. Infolge dessen wird sie sich in gleichen Zeiten vor und nach dem Stoße in derselben Entfernung von der Wand befinden. Stößt aber die Kugel in schiefer Richtung gegen die Wand, so können wir ihre Bewegung AB (Fig. 85) in zwei Componenten AB' und AA' zerlegen. Erstere wird durch den Stoß überhaupt nicht beeinflusst. Nach dem Stoße in B setzt sich die nicht reflectierte Componente BC' mit der reflectierten BB' zur neuen Bewegungsrichtung BC zusammen. Man pflegt diesen Vorgang in der Weise darzustellen,

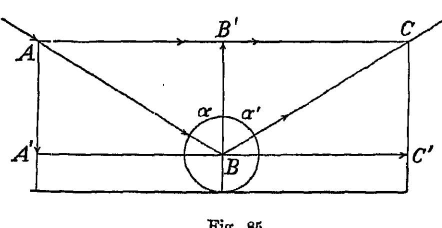


Fig. 85.

dass man den Winkel zwischen der Bewegungsrichtung vor dem Stoße und der Senkrechten an der Stoßstelle, dem sogenannten Einfallslothe, als Einfallswinkel α, und den Winkel zwischen dem Einfallslothe BB' und der Richtung des zurückgeworfenen Körpers BC als Reflexionswinkel α' bezeichnet.

Da nun $AB' = B'C$ und $B'B = B'B$, so müssen also die Dreiecke $AB'B$ und $CB'B$ congruent und daher die Winkel α und α' einander gleich sein.

Die Reflexion erfolgt demnach an einer ebenen Wand so, dass der Reflexionswinkel gleich ist dem Einfallswinkel.

Eine charakteristische Erscheinung für den elastischen Stoß ist die Fortpflanzung desselben von der einen Kugel zur anderen. Der elastische Stoß pflanzt sich sogar durch eine ganze Reihe von Kugeln fort, wenn sich dieselben gegenseitig berühren, und die Richtung des Stoßes durch sämmtliche Mittelpunkte hindurchgeht.

Wichtig ist auch die Erscheinung, dass die gegen eine größere, elastische Masse stoßende Kugel nicht mit jener Geschwindigkeit zurückgeworfen wird, wie von einer festen Wand. Ein Bruchtheil der Bewegung geht also immer auf die gestoßene Kugel über.

Eine pendelförmig schwingende Kugel prallt nach dem Stoße an eine größere Kugel zurück und überspringt plötzlich eine halbe Schwingung, nach der sie sonst erst diese Stelle im entgegengesetzten Sinne durchlaufen hätte.

Hat dagegen die stoßende Kugel die größere Masse, so bewegt sie sich nach dem Stoße noch über die Ruhelage hinaus und überspringt daher keine Phase ihrer Schwingungen, sondern sie ändert nur die Schwingungsweite.

Mit diesen Erscheinungen beim Stoße einer pendelförmig aufgehängten, elastischen Kugel stehen noch andere wichtige Erscheinungen in einem inneren mechanischen Zusammenhange, nämlich die Fortpflanzung von Schwingungen in elastischen Medien, wie in der Luft oder selbst im Lichtäther; hier aber konnten wir sie augenfällig beobachten und sogar vorausberechnen.

Mechanik flüssiger Körper.

Capillarität und Elasticität der Flüssigkeiten.

Capillarität. Die charakteristischen Merkmale eines flüssigen Körpers sind die, dass er „fließen“ und „Tropfen“ bilden könne. Leicht verschiebbar sind auch die Theilchen Mehles, aber wir nennen es nicht flüssig. Es gibt übrigens eine Menge von Übergangsstufen vom festen bis zum flüssigen Zustande, die sich alle der Reihe nach zeigen, wenn wir z. B. ein Stück Wachs langsam erwärmen.

Wenn wir einen mehr als 180 m langen Bleidraht an einem Ende aufhängen würden, so bricht er an der Aufhängestelle auch ohne weitere Belastung sofort ab, weil sein Eigengewicht die Festigkeitsgrenze übersteigt. Bei zunehmender Temperatur würde der Draht schon bei viel geringerer Länge infolge seines Eigengewichtes reißen, und wir würden sagen, er schmilzt ab, wenn er schon bei einer Länge von 1 cm tropfenweise abfällt. Auf der Sonnenoberfläche, wo die Beschleunigung der Gravitation 29mal größer ist als die der Schwerkraft auf der Erdoberfläche, würde das Blei bereits tropfenweise herabfallen, während es bei gleicher Temperatur auf der Erdoberfläche noch einen 29 cm langen Stab bilden könnte, also noch nicht als flüssig gelten könnte. Auf der Sonne werden also manche Körper schon als flüssig erscheinen, die unter sonst gleichen Verhältnissen auf der Erdoberfläche noch als fest erscheinen würden. Es gibt also bei jeder Flüssigkeit ein Gebiet, innerhalb dessen die sogenannten „Cohäsionskräfte“ den

Zusammenhang in einer ähnlichen Weise aufrecht erhalten, wie dies bei den festen Körpern der Fall ist. Die Tropfengröße kann man daher als jenes Flüssigkeitsgebiet auffassen, innerhalb dessen die Cohäsionskräfte der Schwerkraft gleich sind oder sie übertreffen. Man kann daher auch Tropfen von viel größeren Dimensionen herstellen, als sie sich gewöhnlich unter dem Einfluss der Schwerkraft bilden, wenn man die Einwirkung der Schwerkraft durch einen gleichmäßigen Gegendruck aufhebt, wie es beim Plateau'schen Versuch geschieht.

Gibt man nämlich in ein Gefäß zuerst Öl, übergießt es zuerst mit Alkohol und setzt man dann allmählich Wasser zu, bis der so verdünnte Alkohol das specifische Gewicht des Öles erreicht, dann beginnt letzteres in der Lösung zu schwimmen und bildet Tropfen von ungewöhnlicher Größe, weil nun die Schwerkraft nicht mehr deformierend auf ihn einwirkt.

Auch für die feuerflüssigen Massen im Erdinnern kommt die Schwerkraft um so weniger in Betracht, je näher sie dem Erdmittelpunkte liegen, weshalb bei ihnen die nach allen Richtungen hin annähernd gleichen Cohäsionskräfte umso leichter dem Erdballe seine kugelförmige Gestalt geben.

Die Kugelgestalt des Öltropfens beim Plateau'schen Versuch sagt uns ferner, dass die Cohäsionskräfte nach allen Richtungen hin in gleicher Entfernung mit derselben Stärke wirken; hätte sie nach verschiedenen, ganz bestimmten Richtungen verschiedene Stärke, so müsste die Ölmasse die Gestalt eines Krystalles annehmen, dessen Begrenzung aus einer Anzahl einander paralleler Ebenenpaare besteht, weil die Cohäsion nur nach bestimmten Richtungen gleiche Werte hat und für verschiedene Richtungen verschieden ist.

Infolge dieser Cohäsionskräfte treten an der Oberfläche jeder Flüssigkeit die Capillaritätserscheinungen auf, so genannt, weil sie sich bei Capillarröhren besonders auffallend zeigen.

Wenn ein Tropfen Wasser auf eine vollkommen reine, glatte Glasplatte fällt, so breitet er sich auf derselben immer mehr aus, während er über eine staubige Fläche in Kugelgestalt fortrollt. Wir schließen daraus, dass nicht nur innerhalb der Flüssigkeit Kräfte auftreten, sondern auch zwischen ganz verschiedenartigen Körpern, wie Wasser und Glas, eine gegenseitige Anziehungskraft vorhanden ist, die man dann als „Adhäsionskraft" bezeichnet.

Gibt man statt des Wassers einen Quecksilbertropfen auf die Glasplatte, so breitet sich dieser auf derselben nicht aus. Trotzdem ist auch zwischen Glas und Quecksilber Adhäsion vorhanden. Wenn man an eine Wagschale eine Glasplatte hängt, die mit der horizontalen Oberfläche die Oberfläche einer Quecksilbermenge berührt, so ist eine Kraft von mehreren Grammgewichten nöthig, um dieselbe vom Quecksilber loszureißen.

Die Ausbreitung des Wassertropfens auf der Glasplatte kommt nun deshalb zustande, weil in diesem Falle die Adhäsion größer ist, als die Cohäsion, während beim Quecksilber das entgegengesetzte der Fall ist. Dies ergibt sich auch aus dem Verhalten dieser Flüssigkeiten an einer verticalen Gefäßwand. Während nämlich die Wasseroberfläche an der verticalen Glaswand emporsteigt und eine spitzwinklige Kante bildet, neigt sich die Quecksilberoberfläche gegen den Rand und bildet eine stumpfwinklige Kante. An der Grenze zwischen Glas und Wasser wirken auf die Theilchen des letzteren

drei Kräfte (Fig. 86), die Schwerkraft AF, die Cohäsion AB und die Adhäsion AC. Die Richtungen der beiden letzteren stehen auf der Begrenzungswand senkrecht und ihre Resultierende AC' ist also beim Wasser nach außen gerichtet, weil die Adhäsion größer ist. Beim Quecksilber (Fig. 87) ist sie nach innen gerichtet, weil die Adhäsion kleiner ist als die Cohäsion. Im ersten Falle setzt sich diese Kraft mit der Schwerkraft zu einer schief nach außen gerichteten Wirkung AD zusammen, weshalb sich dann die

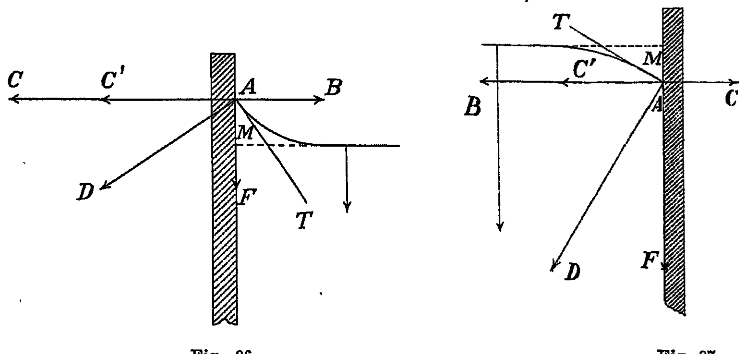


Fig. 86. Fig. 87.

Oberfläche am Rande senkrecht dazu in der Richtung AT einstellt; im zweiten Falle erhalten wir eine schief nach Innen gerichtete Kraft, und die Flüssigkeitsoberfläche muss die Lage AT annehmen. Den zwischen der verlängerten horizontalen Flüssigkeitsoberfläche, der Glaswand und dem gekrümmten Theile der Flüssigkeitsoberfläche liegenden Raum M bezeichnet man als Meniscus der Flüssigkeit.

Dort, wo sich die Flüssigkeitsoberfläche horizontal einstellt, ist die Cohäsionskraft in gleichen Entfernungen von der Oberfläche überall gleich. Je näher aber ein Flüssigkeitstheilchen A, B oder C (Fig. 88) der Oberfläche NN liegt, einen desto stärkeren

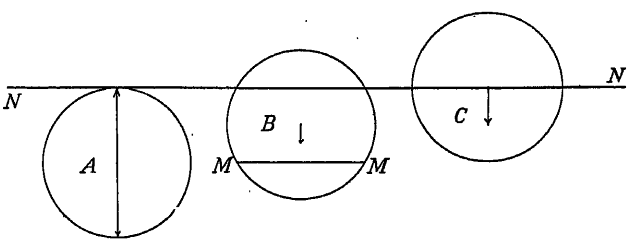


Fig. 88.

Zug üben die Cohäsionskräfte nach Innen aus. Befindet sich das Flüssigkeitstheilchen A so tief unter der Oberfläche, dass der Wirkungsbereich der Cohäsionskräfte ganz in die Flüssigkeit hineinfällt, so heben sich diese nach allen Seiten gerichteten Kräfte gegenseitig auf. Für das Flüssigkeitstheilchen B gleichen sich die Cohäsionskräfte nur mehr innerhalb der Kugelschichte um B aus; die im unteren Kugelabschnitte befindliche Flüssigkeit übt also auf B einen Zug nach unten aus, dem von Seite des oberen Kugelabschnittes kein Gegenzug entspricht. Der Kugelabschnitt, der diesen Zug nach Innen ausübt, ist umso größer, je näher ein Flüssigkeitstheilchen der Oberfläche liegt, und entspricht für einen auf der Oberfläche befindlichen Punkt C dem Zuge der ganzen Halbkugel des Wirkungskreises. Dieser Zug, der auf alle in der Nähe der Oberfläche befindlichen Flüssigkeitstheilchen ausgeübt wird, pflanzt sich dann durch die ganze Flüssigkeit als Oberflächenspannung fort.

Senken wir in ein Gefäß mit Wasser eine so enge Röhre ein, dass sich die Wirkung der Adhäsionskräfte von der Wand aus bis über die Achse der Röhre hinaus geltend macht (Fig. 89), so kann auch längs der ganzen Achse *AB* der durch die Cohäsion hervorgerufene Druck nirgends so groß werden, wie unterhalb der ebenen Oberfläche bei *NN*. Infolge dessen wird die Flüssigkeit in der Röhre so hoch gehoben, bis das Gewicht der gehobenen Flüssigkeit der äußeren Oberflächenspannung das Gleichgewicht hält. Senken wir dagegen diese Röhre in Quecksilber (Fig. 90), so

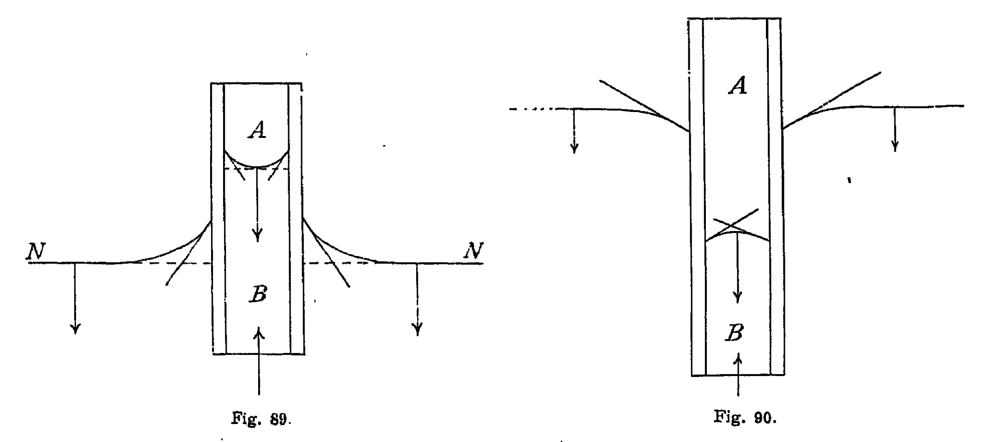


Fig. 89. Fig. 90.

kommen in der Röhre die Cohäsionskräfte umsomehr zur Geltung, als die aus Cohäsion und Adhäsion resultierende Kraft nach Innen fällt und den ohnehin in der Achse schon vorhandenen Oberflächendruck noch vermehrt. Daher stellt sich das Quecksilberniveau in der Röhre tiefer als außerhalb.

Auf dieser Erscheinung beruhen z. B. die saugende Wirkung des Dochtes und des Badeschwammes. Beim Zusammenlöthen von Metallstücken spielt sowohl die Adhäsionskraft des flüssigen Lothes, als auch die Capillarität eine große Rolle. Die Metallstücke, welche zusammen gelöthet werden sollen, müssen daher zuerst sorgfältig gereinigt werden, damit die Adhäsion besser zur Geltung kommt, und dann an der zu löthenden Stelle fest aneinander gedrückt werden, damit die Capillarwirkung kräftiger eintrete.

Die Elasticität der Flüssigkeiten. Während sich die Flüssigkeiten jeder Gestaltsänderung fast widerstandslos fügen, widerstehen sie jeder Verminderung ihres Volumens mit einem ungeheuren Gegendruck, der sofort zur Widerherstellung des früheren Volumens führt, wenn der äußere Druck nachlässt. Die Zusammendrückbarkeit der Flüssigkeiten, die man lange Zeit für etwas Unmögliches hielt, wird mit Hilfe des Piezometers nachgewiesen. Dies besteht aus einem dünnwandigen Glasgefäß *A* (Fig. 91) welches in eine Capillarröhre *RR* ausläuft. Das Volumen des Piezometers, sowie einzelner Theile der Röhre wird durch Füllung mit Quecksilber gemessen, indem man dessen Gewicht durch die Wägung bestimmt. Geben wir nun das mit Wasser gefüllte Piezometer in ein größeres, ebenfalls mit Wasser gefülltes Gefäß *B* und schließen wir das Wasser im Piezometer von dem außerhalb befindlichen durch einen Quecksilbertropfen *J* im Capillarrohr ab, so braucht man den Druck auf das in *B* enthaltene Wasser z. B. nur um 1 kg pro cm^2 zu steigern, um eine Verschiebung des Quecksilberindex *J* von etwa 2 mm zu erhalten, falls das Volumen des Piezo-

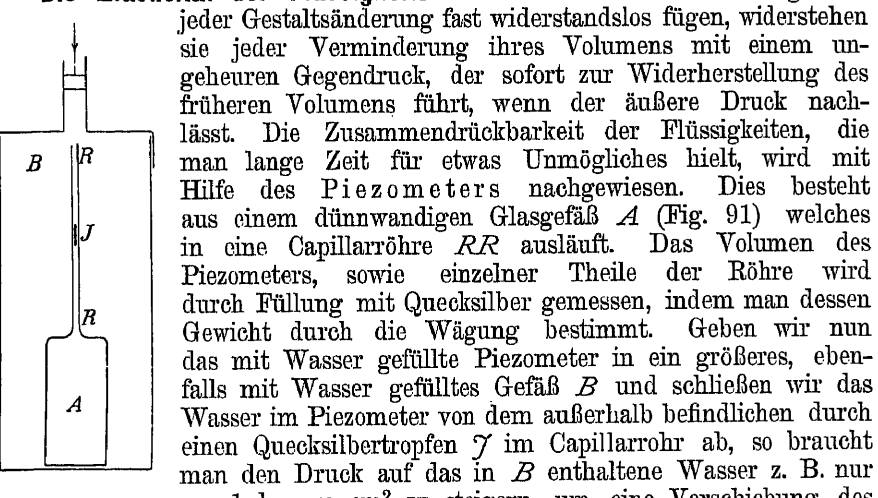


Fig. 1.

meters 50 cm³ und 10 mm der Röhre ein Volumen von 10 mm³ haben. Daraus ergibt sich also eine Volumsverminderung um $2/50000 = 0\cdot000040 = 40 \,.\, 10^{-6}$. Füllt man das Piezometer statt mit Wasser mit Quecksilber, so würde sich bei der gleichen Druckzunahme eine Volumsverminderung von nur $3 \,.\, 10^{-6}$, bei Alkohol eine solche von $90 \,.\, 10^{-6}$ ergeben.

Diese Volumsveränderungen sind aber viel zu unbedeutend, als dass man sie bei kleineren Mengen ohne sehr genau ausgeführte Beobachtungen wahrnehmen könnte, und spielen daher für das Verhalten der Flüssigkeiten in der angewandten Mechanik praktisch keine Rolle, weshalb wir im Folgenden von dieser Eigenschaft, wie auch von den Capillarerscheinungen vollständig absehen können.

Hydrostatik.

Schon um das Jahr 1650 stellte Pascal für das Verhalten der Flüssigkeiten den Fundamentalsatz auf: Der auf die Flächeneinheit ausgeübte Druck pflanzt sich in jeder Flüssigkeit nach allen Richtungen mit derselben Stärke fort. Daher halten sich mehrere auf die Oberfläche der Flüssigkeit wirkende Kräfte das Gleichgewicht, wenn sie den Flächen proportional sind, auf welche sie wirken. Ist das Gefäß A mit Wasser gefüllt (Fig. 92), so muss z. B. auf den Kolben B ein Druck von 2 kg wirken, damit er dem Drucke eines kg auf den Kolben C mit halbem Querschnitt das Gleichgewicht halte. Dieses Verhalten der Flüssigkeiten ergibt sich unmittelbar, wenn wir die bei einer Kolbenverschiebung aufgewendete Arbeit in Rechnung ziehen und zugleich erwägen, dass das Volumen der Flüssigkeit dabei immer dasselbe bleibt. Hat nämlich ein Kolben B den doppelten Querschnitt, so braucht er nur um die Hälfte der Strecke verschoben zu werden, um eine ebenso große Volumveränderung hervorzurufen wie der Kolben C. Das Princip der Erhaltung der Arbeitsgröße erfordert also für die Bewegung des ersten Kolbens die doppelte Kraft; ebenso wird auch auf eine n mal größere Fläche der Gefäßwand ein n mal größerer Gesammtdruck ausgeübt, als auf die Flächeneinheit.

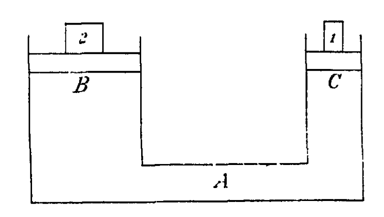


Fig. 92.

Die wichtigste Anwendung dieser gleichmäßigen Fortpflanzung des Druckes in den Flüssigkeiten ist die hydraulische Presse (Fig. 93). Hat der Presskolben P den Radius R und der Druckkolben K den Radius r, so verhalten sich die auf die beiden Kolben ausgeübten Kräfte D und d wie die Querschnitte, also

$$D : d = R^2 \pi : r^2 \pi = R^2 : r^2$$

Wenn also z. B. $R = 10$ cm und $r = 0\cdot5$ cm, so ist $(R/r)^2 = 400$, also $D = 400 \,.\, d$

Wird dann noch der Druckkolben durch einen Hebel mit 5 fachem Kraftarm in Bewegung versetzt, so lässt sich, abgesehen von den Reibungshindernissen, die 2000 fache Kraftwirkung erzielen.

Die hydraulische Presse wird zum Heben sehr großer

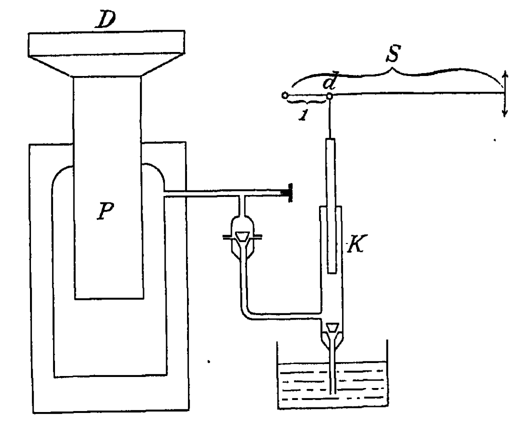


Fig. 93.

Lasten verwendet, z. B. zur Hebung ganzer Schiffe, ferner zum Herauspressen der Säfte aus den Früchten, hauptsächlich also dort, wo es sich darum handelt, kurze und langsame Bewegungen mit sehr großem Kraftaufwande auszuführen.

Ist eine Flüssigkeit nicht nach allen Seiten von festen Körpern eingeschlossen, so hängt der Druck an einer bestimmten Stelle der Flüssigkeit nur von deren Entfernung von der freien Oberfläche ab, ist aber nach oben gerade so groß wie nach unten. Dass der Druck nach oben mit derselben Kraft wirkt, davon kann man sich überzeugen, wenn man einen glatt abgeschliffenen Glascylinder unten mit einer Platte verschließt und in das Wasser taucht. Sie wird dann vom Wasser festgehalten und fällt erst herab, wenn man so viel Wasser in den Cylinder gegossen hat, dass die Druckdifferenz außerhalb und innerhalb des Cylinders kleiner geworden ist als das Gewicht der Platte.

Der Druck p, den eine Flüssigkeit auf den zu ihrer Oberfläche parallelen Boden pro cm^2 ausübt, ist gleich dem Producte aus der Höhe h der Flüssigkeitsschichte und ihrer Dichte. $p = s \cdot h$. Die Folge dieses Gesetzes, dass der Bodendruck unabhängig ist von der Form des Gefäßes, bezeichnet man als das *hydrostatische Paradoxon.*

Befindet sich die Flüssigkeit in einem cylindrischen Gefäße, so stellt uns das Product aus dem specifischen Gewichte s, der Bodenfläche f und der Flüssigkeitshöhe h zugleich das Gewicht der auf dem Gefäßboden ruhenden Last dar; hat aber das Gefäß nach oben divergente oder convergente Wände, so ist im ersten Falle das Gewicht der Flüssigkeit im Gefäße größer, im zweiten Falle kleiner als der Bodendruck.

Dieses Gesetz kann durch folgenden Versuch bestätigt werden. In einm cylindrischen Gefäß (Fig. 94) ist der Kolben K leicht verschiebbar und wird durch das Gewicht der Schale im Gleichgewicht gehalten. Legt man auf dieselbe ein bestimmtes Gewicht G, so beginnt der Kolben K immer bei derselben Flüssigkeitshöhe h zu sinken, gleichviel ob auf den Kolben die in einem cylindrischen, in einem konisch erweiterten oder oben sich verengenden Gefäße befindliche Flüssigkeit ihren Druck ausübt. Im zweiten Falle wird das Gewicht jener Flüssigkeitsmenge, welche außerhalb der cylindrischen Fortsetzung liegt, durch die divergenten Seitenwände getragen. Im dritten Falle üben nicht nur die unter der freien Oberfläche befindlichen Massen, sondern auch die von den Gefäßwänden überdeckten einen der Höhe der Flüssigkeit entsprechenden Druck aus. Damit hängt die Erscheinung zusammen, dass ein Glas Wasser, das wir auf einer Wage in's Gleichgewicht bringen, die Wagschale zum Sinken bringt, wenn wir einen Körper in das Wasser eintauchen, ohne die Gefäßwände zu berühren. Dabei steigt nämlich das Niveau und damit auch der Bodendruck. Zugleich beobachten wir aber, wenn der eingetauchte Körper an einer Federwage hängt, dass sein Gewicht dadurch um ebensoviel abnimmt, als das des Wassers scheinbar zugenommen hat.

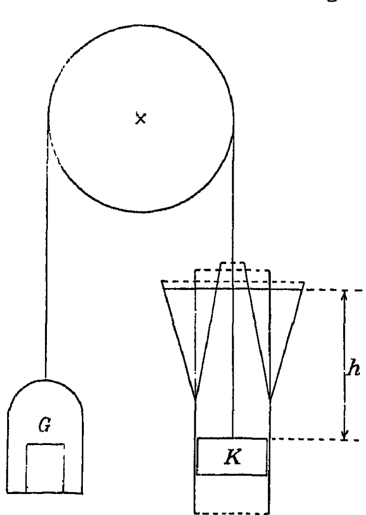


Fig. 94.

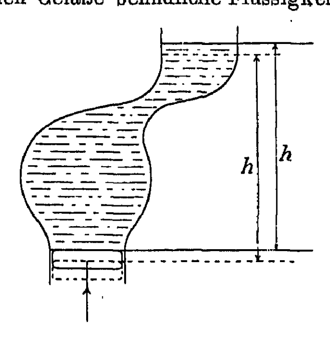


Fig. 95.

Alle diese Erscheinungen ergeben sich sofort als mechanische Nothwendigkeit, wenn wir sie vom Standpunkte der Erhaltung der Arbeit betrachten. Verschieben wir nämlich den Boden eines wie immer geformten Gefäßes (Fig. 95) um eine kleine Strecke nach oben, so ist damit dieselbe Arbeit verbunden, als hätten wir die dabei verdrängte Flüssigkeit bis auf die um h höher liegende Oberfläche gehoben. Ob dort die Flüssigkeit eine größere oder geringere Ausdehnung gewinnt oder etwas mehr nach rechts oder links geschoben wird, ist für die hiezu nöthige Arbeitsleistung ganz gleichgiltig. Das hydrostatische Paradoxon ist also gleichbedeutend mit dem Satze, dass die Arbeit beim Heben einer Last nur vom Gewicht der verschobenen Last und von der Höhe abhängig ist.

Eine wichtige Folge dieses zweiten Fundamentalgesetzes ist die, dass sich in jeder U förmig gekrümmten Röhre die Flüssigkeit in beiden Armen gleich hoch stellt, auch wenn die beiden Röhrentheile sehr verschiedenen Querschnitt haben. Die Erscheinung, dass die Höhe der Flüssigkeitsoberfläche in zwei miteinander in Verbindung stehenden Gefäßen durch deren Form und Querschnitt nicht beeinträchtigt wird, bezeichnet man als das Gesetz von den communicierenden Gefäßen.

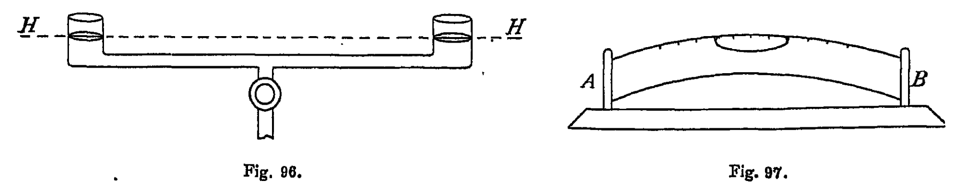


Fig. 96. Fig. 97.

Auf diesem Gesetze beruht die Benützung von communicierenden Röhren zur Construction der Wasserwage (Fig. 96).

Zur Herstellung horizontaler Linien bedient man sich auch der „Libelle" (Fig. 97). Diese besteht aus einer sehr sanft gekrümmten Röhre, die bis auf eine kleine Luftblase mit Wasser gefüllt ist und an der höchst gelegenen Stelle eine Eintheilung trägt. Die Libelle zeigt richtig, wenn sich die Stellung der Luftblase nicht ändert, falls man sie einmal in der Stellung AB und ein zweitesmal in der Stellung BA auf dieselbe Linie in einer Ebene legt. Trifft diese Bedingung zu, so ist damit nicht nur die Richtigkeit der Libelle, sondern auch die horizontale Stellung der Unterlage festgestellt.

Bei vielen feineren Messinstrumenten muss vor der Messung das Fußgestell eine genau horizontale Lage erhalten. Dies ist dann der Fall, wenn sich zwei aufeinander senkrecht stehende Gerade in horizontaler Lage befinden. Häufig gibt man der Libelle auch die Gestalt einer schwachgekrümmten Kugelcalotte und das Instrument befindet sich dann in der richtigen Stellung, wenn die Luftblase mit einem auf der Glasschale bezeichneten Kreise übereinstimmt.

Einen besonders charakteristischen Ausdruck finden die Gleichgewichts- und Druckverhältnisse der Flüssigkeiten im archimedischen Princip. Den unmittelbaren Anlass zur Auffindung desselben soll der Tyrann Hiero von Syracus gegeben haben, als er den berühmten Mathematiker und Mechaniker Archimedes aufforderte, zu untersuchen, ob eine neu hergestellte Krone wirklich aus reinem Golde bestehe. Da sich diese Untersuchung nur mit Benützung des Begriffes „Dichte" durchführen ließ, so war damit die Aufgabe gestellt, die Dichte eines Körpers zu bestimmen. Der am nächsten liegende Weg war also der, zu untersuchen, ob die Krone genau dasselbe Gewicht habe, wie ein gleich großes Volumen zweifellos reinen Goldes. Es musste daher das Volumen der Krone und das eines beliebig gestalteten Stückes reinen Goldes gemessen werden. Die glückliche Lösung der Frage bestand nun darin, dass Archimedes beim Baden auf den Gedanken kam, das Volumen des Körpers durch die Menge des verdrängten Wassers zu messen und diese

wieder mit dem wahrgenommenen Gewichtsverluste in Zusammenhang brachte.

Experimentell wird dieses Princip auf folgendem Wege gezeigt. An die kürzere Wagschale einer hydrostatischen Wage hängt man zuerst einen hohlen Cylinder H (Fig. 98) und unterhalb desselben einen massiven Messingcylinder G, der den ersteren genau auszufüllen vermag. Befindet sich nun die Wage bei dieser Belastung im Gleichgewichte, so wird dasselbe gestört, wenn man den massiven Cylinder G unter Wasser taucht; man kann nun das Gleichgewicht dadurch wieder herstellen, dass man den hohlen Cylinder H mit Wasser füllt, also diese Seite der Wage mit demselben Gewichte belastet wie es der bedrängten Flüssigkeit entspricht: Jeder Körper verliert in eine Flüssigkeit eingetaucht scheinbar so viel von seinem Gewichte als das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit beträgt.

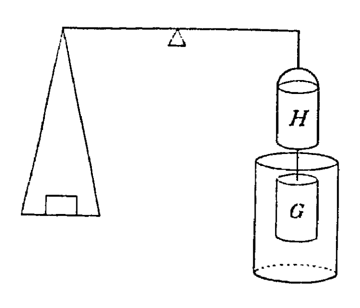


Fig. 98.

Aus den hydromechanischen Grundsätzen ergibt sich dieser Satz durch folgende Erwägungen.

Versenken wir einen Körper K in ein mit Wasser gefülltes Gefäß (Fig. 99), so steigt das Wasser in demselben um soviel, als der Körper seinem Volumen nach verdrängt; zugleich nimmt auch der Bodendruck um einen der Niveaudifferenz h entsprechenden Betrag zu. Das Gewicht des Gefäßes nimmt daher um das Gewicht des Körpers zu, und zwar um den Betrag des von ihm verdrängten Wassers durch die Erhöhung des Bodendruckes, und der Körper selbst kann mithin auf den Boden des Gefäßes nur mehr einen Druck ausüben, welcher seinem um diesen Betrag verminderten Gewichte entspricht, d. h. er erleidet einen Auftrieb im Sinne des archimedischen Principes.

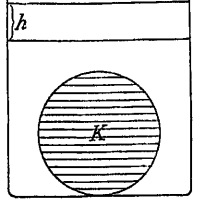


Fig. 99.

Für das Verhalten eines Körpers in einer Flüssigkeit ergeben sich nun je nach der Größe des Auftriebes und des Gewichtes folgende Möglichkeiten:

1. Das Gewicht des Körpers ist größer als das der verdrängten Flüssigkeit; der Körper sinkt in der Flüssigkeit zu Boden.

2. Das Gewicht des Körpers ist dem der verdrängten Flüssigkeit gleich. Dann heben sich diese beiden nach entgegengesetzten Seiten gerichteten Kräfte gegenseitig auf. In diesem Falle schwimmt der Körper in der Flüssigkeit und folgt dann mit der größten Leichtigkeit der leisesten Druckveränderung.

3. Ist endlich das Gewicht des Körpers kleiner als das der verdrängten Flüssigkeit, so steigt der Körper so hoch über die Flüssigkeitsoberfläche empor, bis der unterhalb derselben verbleibende Theil nur mehr soviel Flüssigkeit verdrängt, dass ihr Gewicht dem des Körpers gleich ist. Man sagt dann, der Körper schwimmt auf der Flüssigkeit.

Im letzteren Falle ist die gegenseitige Lage des Schwerpunktes der verdrängten Flüssigkeit W und des Schwerpunktes des Körpers S für die Stabilität seiner Lage beim Schwimmen und daher für den Schiffsbau von der größten Bedeutung.

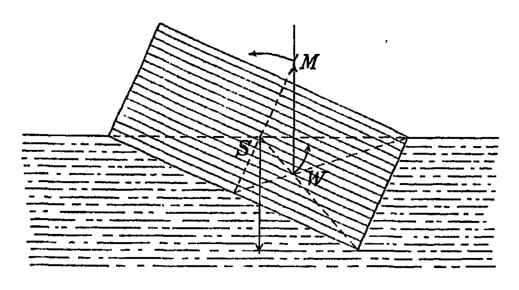


Fig 100.

In den beiden Punkten S und W (Fig. 100) greifen also zwei gleiche Kräfte an und bilden miteinander einen Drehzwilling oder ein Kräftepaar, welches den Körper im Sinne des Pfeiles dreht. Dieser schwimmt daher so lange stabil, als dieses Drehmoment die Symmetrieachse SM aufzustellen sucht. Dies ist aber dann der Fall, wenn die durch W gelegte verticale Gerade die Symmetrielinie oberhalb des Punktes S in M schneidet. Den Punkt M nennt man das Metacentrum. Diese Stabilitätsbedingung drückt man daher auch in der Weise aus, dass man sagt, der Körper schwimmt stabil, wenn das Metacentrum M oberhalb des Schwerpunktes S liegt.

Dichtebestimmungen für feste und flüssige Körper.

Unter der Dichte eines Körpers versteht man die Zahl, wie vielmal mehr Masse ein Körper besitzt als ein gleich großes Volumen Wasser von der Temperatur 4° C. Unter dem specifischen Gewichte dagegen versteht man das Gewicht der Volumseinheit. Da nun im metrischen System das Gewicht der Volumseinheit Wasser zugleich Gewichtseinheit ist, so fallen für dasselbe diese beiden Maßzahlen zusammen. Wir wollen die wichtigsten Methoden zur Feststellung dieser für die physikalische Natur eines Körpers so wichtigen Maßzahl im Zusammenhang hier anführen.

1. Mit Hilfe der hydrostatischen Wage. Ist der Körper, dessen specifisches Gewicht bestimmt werden soll, im Wasser unlöslich und dichter als dasselbe, so befestigt man ihn an der kürzeren Wagschale und bestimmt zuerst sein Gewicht in der Luft P. Taucht man ihn dann unter Wasser, so findet man den Auftrieb Q, indem man auf die kürzere Wagschale so viele Gewichte legt, bis der Auftrieb ausgeglichen ist. Das Verhältnis der auf der längeren und auf der kürzeren Wagschale liegenden Gewichte gibt dann die Dichte an $s = P/Q$.

Wenn man das specifische Gewicht auf diesem Wege bestimmt hat, oder anderswoher kennt, so kann man auch aus der Gleichung $Q = P/s$ auf sehr einfache Weise das Volumen eines Körpers bestimmen.

Ist das specifische Gewicht des Körpers kleiner als 1, sodass er also auf dem Wasser schwimmen würde, dann bestimmt man zuerst für einen Körper K, dessen Dichte größer als 1 ist, den Auftrieb im Wasser, er sei gleich Q'. Dann bestimmt man den Auftrieb der miteinander verbundenen Körper $Q + Q'$ und erhält $s = P/[(Q + Q') - Q']$

Um das specifische Gewicht einer Flüssigkeit zu finden, bestimmt man den Auftrieb eines in ihr unlöslichen Körpers zuerst im Wasser, er sei Q, und dann in dieser Flüssigkeit Q'; die Dichte dieser Flüssigkeit ist sodann $\sigma = Q'/Q$.

Um endlich das specifische Gewicht eines im Wasser löslichen Körpers zu finden, bestimmt man zuerst sein Gewicht P und dann den Auftrieb Q'' in einer Flüssigkeit von der Dichte s', in welcher er sich nicht löst. Wäre Q der Auftrieb des Körpers im Wasser, dann hätten wir $s' = Q''/Q$, und daher $Q = Q''/s'$, also ist $s = P/Q = \frac{P s'}{Q''}$

2. Viel rascher und einfacher, freilich etwas weniger genau, lassen sich diese Messungen mit Hilfe einer Zeigerwage oder mit Hilfe der Jolly'schen Federwage durchführen. (Fig. 101). Im letzteren Falle werden Gewicht und Auftrieb nur nach der Verlängerung und Verkürzung der Feder gemessen, an welcher der Körper aufgehängt wird, und das Verhältnis der Verlängerungen entspricht dann dem der Gewichte.

Fig. 101.

3. Zur Bestimmung des specifischen Gewichtes von Flüssigkeiten bedient man sich auch der Aräometer oder „Senkwagen" (Fig. 102).

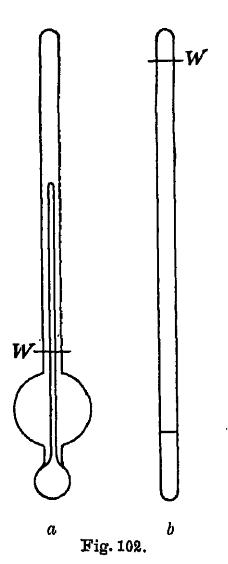


Fig. 102.

Diese bestehen aus Glasröhren, die am unteren Ende mit Schrotkörnern belastet sind und daher mit verticaler Achse stabil schwimmen. Meistens enthalten sie auch ein Thermometer, weil die Richtigkeit der Ablesung auch von der Temperatur abhängig ist.

Das Aräometer hat in der Umgebung der Stelle, bis zu welcher es in eine Flüssigkeit einsinkt, überall denselben Querschnitt q und längs der Achse eine Scala. Die Stelle, bis zu welcher das Aräometer im Wasser einsinkt, W, heißt „Wasserpunkt". Die Eintheilung wird nun so ausgeführt, dass z. B. zwischen zwei Theilstrichen der hunderte Theil des unter dem Wasserpunkte befindlichen Volumens entfällt. Ragen dann n solche Theile aus der Flüssigkeit hervor, so wissen wir, dass $100-n$ Volumtheile der Flüssigkeit dasselbe Gewicht haben wie 100 Raumtheile Wasser. Dann ist das specifische Gewicht der Flüssigkeit $s = \frac{100}{100 - n}$.

Sinkt aber das Aräometer bis über den Wasserpunkt in der Flüssigkeit ein, ist also die Flüssigkeit weniger dicht als Wasser, so haben demnach $100 + n$ Volumtheile derselben das gleiche Gewicht wie 100 Theile Wasser, und daher ist dann die Dichte der Flüssigkeit $s = \frac{100}{100 + n}$.

Gewöhnlich werden eigene Aräometer angefertigt für Flüssigkeiten, welche weniger dicht sind als Wasser, und solche für dichtere Flüssigkeiten. Letztere haben den „Wasserpunkt" oben und steigen aus der Flüssigkeit umsomehr heraus, je dichter dieselbe ist; erstere haben den „Wasserpunkt" möglichst tief und sinken in die zu messende Flüssigkeit um so tiefer ein, je geringer ihr specifisches Gewicht ist. Bei manchen Aräometern ist an den verschiedenen Theilen der Scala bereits die Dichte der Flüssigkeit angegeben, in welcher dieses Aräometer bis zu dieser Stelle eintaucht. Solche Aräometer bezeichnet man als Densimeter.

Aräometer, die zur Messung der Dichte der Milch bestimmt sind, bezeichnet man als Milchwagen oder Galaktometer. Bei Aräometern, die zur Bestimmung des Alkoholgehaltes einer Flüssigkeit dienen, findet man oft an der Scala sofort den Procentgehalt angegeben.

Die Aräometer nach Beaumè besitzen am cylindrischen Theile eine Scala mit Einheiten von ursprünglich willkürlicher Länge, und auf einer beigegebenen Tabelle sind die den einzelnen Theilstrichen entsprechenden Flüssigkeitsdichten, beziehungs-weise die Procente angegeben, die auf einen Bestandtheil der Mischung en

4. Bei vielen Dichtebestimmungen bedient man sich des r meters (Fig. 103). Das Pyknometer besteht aus einem kleinen f förmigen Gefäß mit einem eingeriebenen Stöpsel, der längs seiner Achse durchbohrt ist. Wird das Pyknometer mit einer Flüssigkeit gefüllt und dann der Stöpsel aufgesetzt, so füllt sich die denselben durchsetzende Capillarröhre bis zum äußersten Ende mit der Flüssigkeit. Das Gewicht des Pyknometers p wird ein für alle Mal genau bestimmt und notiert; ebenso sein Inhalt v, welchen man durch eine sehr sorgfältige Wägung des Pyknometers mit Wasser oder Quecksilber erhält.

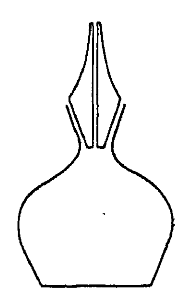


Fig. 103.

Um nun das specifische Gewicht einer Flüssigkeit zu bestimmen, braucht man nur das Pyknometer mit derselben zu füllen, dann vom Gesammtgewicht P das des Pyknometers p zu subtrahieren und durch das Volumen v zu dividieren. Mit Vortheil bedient man sich auch des Pyknometers zur Bestimmung der Dichte und des Volumens sehr kleiner, fester Körper. Ist deren Gewicht P und Q ihr Volumen, so ist $s = P/Q$. Der Wert Q ergibt sich, indem man die zu untersuchenden kleinen Körper, z. B. Krystalle, in das mit Wasser gefüllte Pyknometer gibt und dann dessen Gewicht R bestimmt. Dann ist

$$R = p + v + P - Q, \text{ also } Q = p + v + P - R.$$

5. Das specifische Gewicht einer Flüssigkeit kann auch dadurch ermittelt werden, dass man zuerst in eine U-förmig gebogene Röhre Quecksilber gießt und dann in die eine Röhre Wasser, in die andere die Flüssigkeit gibt, deren Dichte bestimmt werden soll. Wenn man nun in letztere so viel Flüssigkeit gibt, dass die beiden Quecksilberoberflächen gleich hoch stehen, so dass sich also das Quecksilber selbst und beide Flüssigkeitsmengen das Gleichgewicht halten, so stehen die Dichten der beiden Flüssigkeiten zu den Höhen der Flüssigkeitssäulen im verkehrten Verhältnis. Dasselbe Ziel erreicht man auch dadurch, dass man eine Flüssigkeit und Wasser durch eine gemeinsame Saugvorrichtung aus zwei getrennten Gefäßen in langen verticalstehenden Röhren aufsaugt, und dann wieder die Höhen der Flüssigkeitssäulen miteinander vergleicht.

Tabelle einiger Werte von specifischen Gewichten:

Platin	21·5	Zink	7·2	Olivenöl	0·92
Gold	19·3	Glas	2·6—3·9	Äther	0·74
Quecksilber	13·6	Hartgummi	1·15	Chlor	0·00318
Blei	11·3	Kautschuk	0·95	Kohlensäure	0·00197
Silber	10·5	Buchenholz	0·75	Sauerstoff	0·00143
Kupfer	8·9	Fichtenholz	0·47	Luft	0·001293
Nickel	8·3	Steinsalz	2·28	Stickstoff	0·00126
Messing	8·4	Schwefelsäure	1·14	Wasserstoff	0·0000895
Eisen	7·6	Alkohol	0·79		

Hydrodynamik.

Während sich bei einer ruhenden Flüssigkeitsmenge die Oberfläche immer horizontal einstellt, haben die in Bewegung befindlichen Flüssigkeitsmengen je nach ihrer Richtung und Geschwindigkeit die verschiedensten Begrenzungsformen. In einem cylindrischen Gefäße mit verticaler Achse stellt sich z. B. die Flüssigkeit bei zunehmender Drehungsgeschwindigkeit nicht mehr horizontal ein, sondern die Oberfläche nimmt allmählich die Gestalt eines hohlen Rotationsparaboloides an, weil die gegen die cylindrische Wand gerichtete Fliehkraft umso stärker wird, je größer der Radius ist.

Ein in schiefer oder horizontaler Richtung austretender Wasserstrahl beschreibt genau denselben Parabelbogen wie ein fester Körper, den man mit derselben Geschwindigkeit abschleudert, und verhält sich störenden Einflüssen gegenüber in mehrfacher Hinsicht wie ein fester Körper.

An die Stelle des Gesetzes vom hydrostatischen Bodendruck tritt in der Hydrodynamik das Torricellische Ausflussgesetz. Befindet sich im Boden eines Gefäßes, das bis zur Höhe h mit Wasser gefüllt ist, eine kleine Öffnung, so trete durch dieselbe während einer gewissen Zeit die Wassermenge m mit der Geschwindigkeit v aus; ihre lebendige Kraft ist daher $m\,v^2/2$, während gleichzeitig an der Oberfläche ebensoviel Wasser verschwindet. Es ist also in der Flüssigkeit eine Energie der Lage im Werte von $m\,g\,h$ Arbeitseinheiten verloren gegangen; dafür treten am Boden des Gefäßes $m\,v^2/2$ Arbeitseinheiten als Energie der Bewegung auf und müssen also den ersteren gleichwertig sein.

Aus der Gleichung $m\,g\,h = m\,v^2/2$ folgt nun $v = \sqrt{2\,g\,h}$, d. h.: Aus der Öffnung eines mit Flüssigkeit gefüllten Gefäßes tritt die Flüssigkeit mit einer Geschwindigkeit aus, als ob sie von der Oberfläche bis zu dieser Stelle frei herabgefallen wäre.

Allerdings wird ein nicht unbeträchtlicher Theil dieser Energie zur Überwindung der Reibung an der Ausflusstelle verwendet, so dass in Wirklichkeit nur etwa 97% der nach der obigen Formel berechneten Wassermenge ausfließen. Zugleich schnürt sich der Wasserstrahl unmittelbar nach der Ausflusstelle bei A (Fig. 104) bis auf 0·8 seines Durchmessers zusammen. Man bezeichnet diese Erscheinung als die Contractio venae. Infolge dessen sinkt der Querschnitt des Ausflusstrahles auf 0·64 der Oeffnungsweite herab, und erst, wenn wir diesen Betrag noch mit 0·97 multiplicieren, so erhalten wir einen der thatsächlich beobachteten Ausflussmenge entsprechenden Wert, das heißt, die durch die Contractio venae und durch die Reibung verminderte Ausflussmenge beträgt nur mehr 0·62 von der nach dem Torricelli'schen Gesetze für die ganze Öffnungsgröße berechneten Wert.

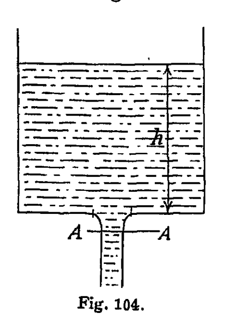


Fig. 104.

Für das Verhalten des Wassers in einem geschlossenen Röhrensysteme hat bereits der wegen seiner allseitigen Kenntnisse berühmte Maler Leonardo da Vinci wesentliche Merkmale angegeben. Er stellte auch fest, dass die in einer gewissen Zeit durch den Querschnitt des Röhrensystemes fließende Wassermenge überall gleich sein müsse. Die unmittelbare Folge davon ist, dass sich das Wasser in einem engen Theile des Röhrensystemes viel schneller fortbewegen muss, als in einem weiten. Diese Geschwindigkeitsänderungen sind auch mit entsprechenden Druckänderungen verbunden.

Wenn in einem cylindrischen Canal der Druck am einen Ende größer ist, so muss die Flüssigkeit in der Richtung gegen das andere Ende hin

eine Beschleunigung erfahren, die um so größer ist, je stärker der Druck abnimmt.

Ist an zwei um 1 cm von einander entfernten Punkten der Druck pro cm² um p Dyn geringer, so wird ein cm³ einer Flüssigkeit mit der Dichte s eine solche Beschleunigung erfahren, dass die auf einen cm³ entfallende Zunahme an lebendiger Kraft $s\,v_2^2/2 - s\,v_1^2/2$ der auf diese Strecke entfallenden Druckabnahme $p = p_1 - p_2$ gleich ist.

Aus der Gleichung $p_1 - p_2 = s\,v_2^2/2 - s\,v_1^2/2$

folgt dann $p_1 + s\,v_1^2/2 = p_2 + s\,v_2^2/2$,

d. h. die Summe aus der auf 1 cm^3 entfallenden lebendigen Kraft und dem hier pro cm² herrschenden Druck bleibt überall gleich groß.

Ist z. B. bei einer Wasserleitung der Druck pro cm² 1.011 Kilogramm, also ungefähr so groß wie der Atmosphärendruck, so beträgt er in allen Theilen des Röhrensystems in absoluten Einheiten ausgedrückt 10^6 Dyn pro cm². Setzt sich nun das Wasser in Bewegung, so besteht für den ganzen Wasserstrom die Gleichung $10^6 = p_1 + \frac{1 \,.\, v^2}{2}$; wenn nun an einer Stelle die Geschwindigkeit infolge Verengung der Röhre den Wert v annimmt, so ist dort der Druck $p = 10^6 - \frac{v^2}{2}$ und wenn $v^2 = 2.10^6$ also $v = 10^3 \sqrt{2} = 1414$ (cm sec^{-1}) $= 14{\cdot}14$ (m sec^{-1}), so hört der Druck in der Röhre vollständig auf, weil dann $p = 0$.

Ein mit großer Geschwindigkeit ausfließender Wasserstrahl übt daher auf eine in denselben mündende Röhre eine saugende Wirkung aus, da im Innern des Wasserstrahles ein sehr geringer Druck, außerhalb aber der atmosphärische Luftdruck herrscht.

Der hydraulische Widder (Fig. 105). Die im Fallrohr A enthaltene Wassermenge nimmt beim automatischen Öffnen des Ventils T eine ziemlich große Geschwindigkeit an; sobald aber dieselbe ein gewisses Maß erreicht hat, reißen die Wassermassen die unten am Ventil T befestigte Platte mit sich und verschließen sich damit plötzlich den Ausgang. Dann treten sie durch das Ventil V in den Windkessel W ein und hier wird nun die ganze lebendige Kraft des Wassers zur Compression der eingeschlossenen, elastischen Luft verwendet. Diese gibt dann die in ihr aufgespeicherte Arbeit wieder ab, indem sie auf das Wasser einen Druck ausübt, bis es im Steigrohr S so hoch steigt, dass die dabei geleistete Arbeit der Arbeit der früher eingedrungenen Wassermassen gleich ist. Wenn z. B. 40 Liter im Fallrohr A 10 m herabgesunken sind, so vermögen sie mit ihrer Arbeitskraft von 400 kg im Steigrohr 10 Liter Wasser 40 m hoch zu heben. Auch hier bleibt die Arbeitsleistung hinter dem berechneten Werte etwas zurück, aber der mechanische Erfolg ist dennoch günstiger, als wenn man Wasserräder und Pumpen zur Hebung des Wassers benützen würde.

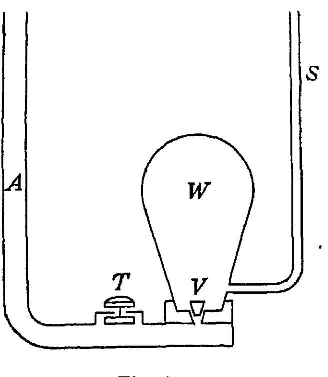


Fig. 105.

Von der größten Wichtigkeit für die Industrie wasserreicher Länder sind die Vorrichtungen, welche dazu dienen, die lebendige Kraft der Gewässer in nutzbringende Arbeit umzusetzen.

Die wichtigsten Typen der verschiedenen Wasserräder sind die folgenden:

1. Das oberschlächtige Zellenrad (Fig. 106). Das Wasser strömt ohne belangreiche Geschwindigkeit in die auf dem Radkranze befestigten Zellen, füllt sie, und infolge dieser einseitigen Belastung der einen Radhälfte kommt ein dauerndes Drehmoment zustande. Der Gang solcher Räder ist ein relativ langsamer, weshalb man sie hauptsächlich dort anwendet, wo man keine hohe Tourenzahl braucht, da die Übersetzungen auf eine viel raschere Rotation immer mit sehr starken Verlusten durch Reibung verbunden sind.

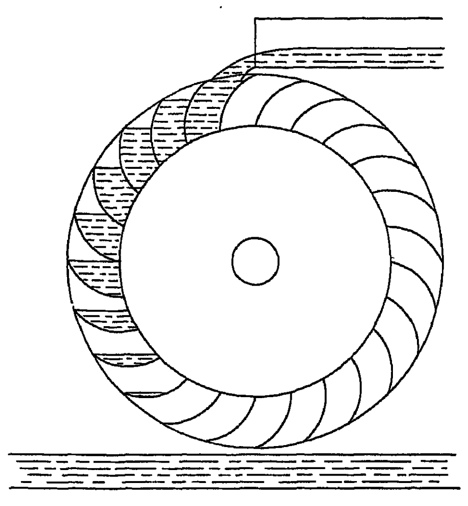


Fig. 106.

2. Handelt es sich darum, eine sehr hohe Tourenzahl zu erzielen, so ist es zweckmäßiger, solche Wasserräder in Anwendung zu bringen, die unmittelbar vom Wasser schon eine große Drehungsgeschwindigkeit erhalten. Dies erreicht man am einfachsten, indem man das Wasser zuerst durch eine steile Rinne herabstürzen lässt; erst dann, wenn es bereits eine große Geschwindigkeit angenommen hat, gelangt es zu den Schaufeln des Rades, welches nun eine umso größere Tourenzahl annimmt, je kürzere Speichen es hat (Fig. 107). Ob dann das Wasser die Schaufeln oberhalb oder unterhalb trifft, ist in diesem Falle von geringerer Bedeutung. Da das Wasser bei solchen Rädern die Rinne noch mit einer namhaften Geschwindigkeit, nämlich mit der Geschwindigkeit der Radschaufeln verlässt, so folgt daraus, dass hier die Triebkraft des Wassers nicht gut ausgenützt wird. Dagegen haben aber solche Räder den Vorzug, dass sie sehr wenig Raum einnehmen und bei annähernd gleicher Leistung viel weniger Kosten verursachen.

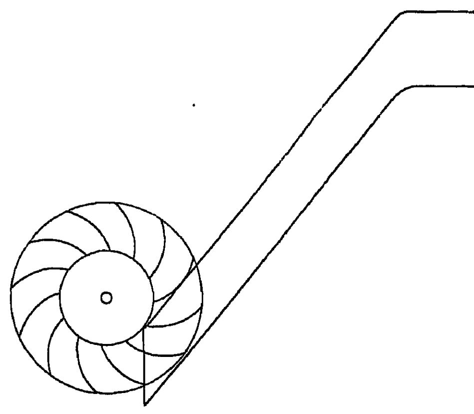
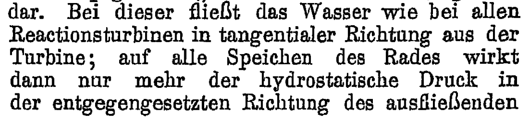


Fig. 107.

3. Die verschiedenen Turbinenconstructionen gehen darauf hinaus, eine möglichst ökonomische Ausnützung der Wasserkraft mit einer für den jeweiligen Bedarf passend gewählten Tourenzahl zu verbinden. Ob dabei die Rotationsachse horizontal oder vertical gestellt wird, ist von nebensächlicher Bedeutung. Dagegen unterscheidet man Actions- und Reactionsturbinen, jenachdem zum Antriebe derselben die lebendige Kraft des auf die Schaufeln stürzenden Wassers oder aber der hydraulische Druck einer seitlich ausfließenden Wassermenge verwendet wird. Bei vielen Turbinen werden beide Antriebsmittel gleichzeitig benützt.

Die einfachste Construction einer Reactionsturbine stellt das Segner'sche Wasserrad und die nach demselben Princip gebaute „schottische Turbine“ (Fig. 108) dar.



Bei dieser fließt das Wasser wie bei allen Reactionsturbinen in tangentialer Richtung aus der Turbine; auf alle Speichen des Rades wirkt dann nur mehr der hydrostatische Druck in der entgegengesetzten Richtung des ausfließenden

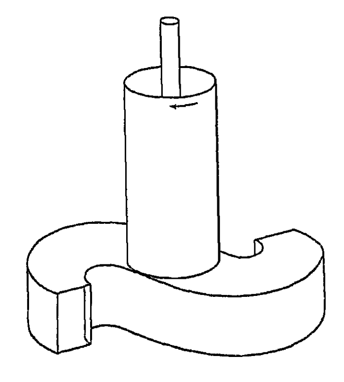


Fig. 108.

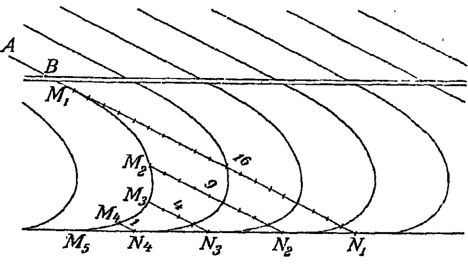


Fig. 109.

Wassers. Um die lebendige Kraft des Wassers möglichst gut auszunützen, gibt man bei den Actionsturbinen den Schaufeln eine parabolisch gekrümmte Form, wie es Fig. 109 zeigt, und lässt das Wasser in der Richtung der Tangente AB an die Parabel eintreten. Dadurch erreicht man zunächst, dass das Wasser mit seiner hohen Geschwindigkeit von der viel langsamer beweglichen Schaufel nicht nach den Gesetzen des elastischen Stoßes zurückgeworfen wird. In diesem Falle würde es nämlich an die Schaufel viel weniger Energie abgeben. Wenn nun das Wasser der Schaufelfläche entlang gleitet, so ist es gezwungen, in der Richtung der Componente MN eine gleichförmig verzögerte Bewegung auszuführen und dabei seine lebendige Kraft allmählich abzugeben. Wie nämlich ein Punkt, der den Weg $M_5\,M_4\,M_3\,M_2\,M_1$ zurücklegt, analog der Bewegung beim schiefen Wurf in der Richtung NM eine gleichförmig beschleunigte Bewegung ausführen würde, so nimmt bei einer Bewegung im entgegengesetzten Sinne der Punkt M in dieser Richtung eine gleichförmig verzögerte Bewegung an, und daher fällt schließlich das Wasser nach Abgabe der Bewegungsenergie „todt“ aus der Turbine heraus. Die Ausnützung der Wasserkraft ist daher eine viel vollkommenere, als bei den früher erwähnten Wasserrädern. Die Vermeidung des elastischen Stoßes zwischen Wasser und Schaufel ist noch viel wichtiger für die Hochdruckturbinen, wie z B. beim Pelton-schen Löffelrade, wo das Wasser mit noch viel größerer Geschwindigkeit ebenfalls tangentiell zur Löffelfläche eintritt und bei der allmählichen Geschwindigkeitsverzögerung fast alle Energie abgibt. Dabei erreicht man den großen Vortheil, dass man mit sehr wenig Wasser bei hohem Druck und demgemäß großer Geschwindigkeit denselben Effect erzielt, wie mit vielem Wasser bei niedrigem Gefälle.

Die Arbeit, die das Wasser verrichtet, während es nur die Turbine in Drehung erhält, ohne gleichzeitig andere Maschinen in Bewegung zu versetzen, bezeichnet man als Leerlaufarbeit. In diesem Falle geht die Turbine mit ihrer größten Tourenzahl und hat nur die eigenen Reibungswiderstände zu überwinden. Die hiebei aufgewendete Kraft ist daher ein Minimum, der bei dieser Arbeitsleistung pro Secunde zurückgelegte Weg aber ein Maximum. Sobald nun die Turbine „belastet“ wird, geht die Tourenzahl sofort zurück, bis auf die langsamer zurückweichenden Schaufeln soviel Wasser stürzt, dass auch die „Nutzarbeit“ geleistet werden kann. Würde man nun eine Turbine derart belasten, dass sie fast still steht, so würde die von der Turbine aufgenommene Kraft allerdings zu einem Maximum anwachsen, aber mit der verminderten Tourenzahl würde zugleich der zurückgelegte Weg so klein werden, dass das Product aus Kraft und Weg doch keinen günstigen Wert für die dabei geleistete Arbeit ergibt. Im allgemeinen ist auch hier eine mittlere Ganggeschwindigkeit im

Interesse der zu leistenden Arbeit der goldene Mittelweg. In der Regel verlangt aber der Betriebszweck eine ganz bestimmte Ganggeschwindigkeit. Um daher für stärkere Belastungen die nöthige Tourenzahl aufrecht zu erhalten, pflegt man den Wasserzufluss in der Weise zu regulieren, dass derselbe mit der Belastung in geeigneter Weise wächst und abnimmt.

Unter der im allgemeinen zutreffenden Annahme, dass ein gutes Wasserrad $75^0/_0$ der im Wassergefälle vorhandenen Arbeit nutzbar mache, kann die von demselben pro Secunde geleistete Arbeit, also der Effect, auf folgende Weise rasch abgeschätzt werden. Man ermittelt die in der Secunde in das Wasserrad eintretende Wassermenge und drückt sie in „Litern pro Secunde" aus. Wenn man diese Zahl mit der in Metern gemessenen Höhe des Gefälles multipliciert, so erhält man die ganze Arbeit pro Secunde in Kilogrammetern pro Secunde, und in Pferdekräften, wenn man diese Zahl noch durch 75 dividiert. Falls nun ein Wasserrad nur $75^0/_0$ von dieser Arbeitsleistung auszunützen gestattet, so müssen wir den berechneten Betrag wieder mit 75 multiplicieren und durch 100 dividieren; wir erhalten also diese Leistung unmittelbar in Pferdekräften ausgedrückt, wenn wir einfach die Zahl der Liter pro Secunde mit der Höhe des Gefälles multiplicieren und durch 100 dividieren.

Den von einem Wasserrade oder überhaupt von einem Motor erreichten Effect findet man durch Messung mit dem Prony'schen Zaum (Fig. 110). Diese Vorrichtung besteht aus einem Hebel ABC, der am einen Ende mit zwei hölzernen Backen die Radwelle W umfasst. Die Stärke des Zuges in C wird durch ein Dynamometer D gemessen, also durch eine Art Federwage, an welcher der Zeiger die ausgeübte Kraft in Kilogrammen angibt. Um den Punkt C des Hebels mit der Kraft P einmal im Kreise herumzudrehen, wäre die Arbeit $2\,l\pi P$ nöthig. Die gleiche Arbeit leistet die rotierende Radwelle W, wenn wir den Punkt C festhalten. Bei n Umdrehungen in der Secunde ist also der Effect gleich $2\pi l P n$ und $\frac{2\pi}{75}\,l n P$ Pferdekräfte, wenn wir l in Metern und P in kg messen. Dieser Effect ist also auch

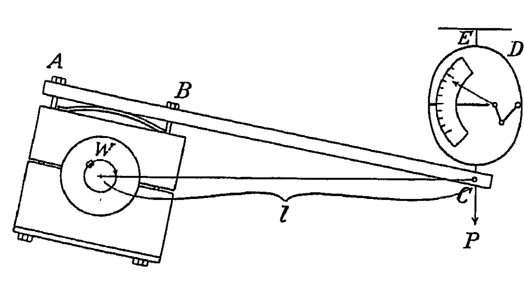


Fig. 110.

$$\frac{2\pi \,.\, 736}{75}\,l n P = 61{\cdot}66\,l n P \,\text{Watt},$$

wenn sich n auf die Secunde bezieht und gleich $1{\cdot}03\;l n' . P$ Watt, wenn sich n' auf eine Minute bezieht, wie es in der Technik vielfach üblich ist.

Aëromechanik.

Wenn man auf den Boden eines mit Wasser gefüllten Gefäßes ein Kilogrammgewicht stellt und dann ein mit der Öffnung nach unten gekehrtes Becherglas in die Flüssigkeit eintaucht, so treten sofort Luftblasen über den Rand des Glases, sobald das Kilogrammgewicht in den mit Luft erfüllten

Raum des Glases eindringt. Der eingeschlossenen Luft kommt also ein gewisser Raum zu, durch dessen Verminderung sie verdrängt worden ist.

Schließt man eine bestimmte Luftmenge durch einen Kolben in einer cylindrischen Röhre ab, so lässt sich zwar deren Volumen durch Verschiebung des Kolbens leichter vermindern als beim Wasser, aber auch dazu ist zuerst eine gewisse Kraft und bei einer Verschiebung um eine bestimmte Strecke eine entsprechende Arbeitsleistung nöthig.

Während also eine gewisse Masse eines festen Körpers nicht nur ein genau bestimmbares Volumen, sondern auch eine unveränderliche Gestalt hat, und die Flüssigkeiten wenigstens ein nahezu constantes Volumen zeigen, ist bei den Gasen auch dieses noch sehr veränderlich, aber es besteht eine einfache Beziehung zwischen Volumen und Druck, mit der wir uns nun zu befassen haben.

Diese zuerst vom irländischen Experimentator Robert Boyl, Grafen von Cork, im Jahre 1661 erkannte Eigenschaft wurde später, im Jahre 1679 unabhängig von diesem durch Edme Mariotte, dem Prior von „St. Martin sur Beaune" bei Dijon, entdeckt und dadurch besser formuliert, dass er behauptete, das Volumen sei dem auf das Gas ausgeübten Drucke verkehrt proportional.

Bezeichnen wir den Druck pro cm² mit p und das Volumen mit v, so können wir dieses gewöhnlich nach Mariotte benannte Gesetz in der Weise aussprechen, dass wir sagen: Für jedes Gas behält das Product pv bei constanter Temperatur immer denselben Wert bei.

Experimentell lässt sich dieses Fundamentalgesetz der Aëromechanik folgendermaßen bestätigen.

1. Versuch. Zwei oben mit Hähnen verschließbare Glasröhren A und B (Fig. 111) sind durch einen Schlauch miteinander verbunden und bilden also ein communicierendes Gefäß, das bis zu einer gewissen Höhe mit Quecksilber gefüllt wird. Senken wir nun die Röhre B so tief, dass das Quecksilber gerade bis zum Hahn H_2 reicht, und schließen wir ihn dann, so können wir diese Röhre allein sammt dem Quecksilber so hoch heben, bis dasselbe über 70 cm höher steht, als in der offenen Röhre A. In der Nähe des Meeresufers und bei einer Temperatur von $0^0\,C$ würde sich sogar eine Niveaudifferenz von 76 cm herstellen lassen. Da man diesen Wert des Luftdruckes als den normalen angenommen hat, wollen wir ihn allen weiteren Versuchen zu Grunde legen. Heben wir die Röhre B noch höher, so stellt sich oberhalb der Quecksilberkuppe ein luftleerer Raum ein, den man als das „Torricellische Vacuum" bezeichnet. Da nun eine Quecksilbersäule von dieser Länge einen Druck von $13{\cdot}59 . 76 = 1033{\cdot}3\,g$. pro cm² $= 1{\cdot}013 \times 10^6$ Dyn pro cm² ausübt, so müssen wir schließen, dass auch der Druck der atmosphärischen Luft ebensogroß ist. Dass aus einer mit Wasser gefüllten und oben geschlossenen Röhre von

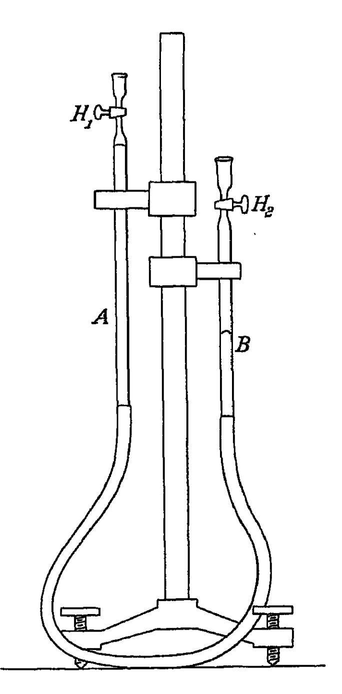


Fig. 111.

etwa 10 m Höhe das Wasser nicht herausfließt, hatte schon Galilei gewusst. Sein geistreicher Schüler und wissenschaftlicher Nachfolger J. Evang. Torricelli veranlasste aber im Jahre 1643 seinen Freund Viviani, die analoge Erscheinung am Quecksilber zu beobachten und sagte vorher, dass die Quecksilbersäule nicht mehr 1 m hoch sein könne. Durch den Umstand nun, dass die Höhe der Quecksilbersäule, die wir nun als den Barometerstand bezeichnen, sich sehr oft und ziemlich stark änderte, kam Torricelli auf den Gedanken, dass die Ursache dieser Änderungen nicht am Apparate liegen könne, sondern dass der veränderliche Luftdruck diese Schwankungen hervorbringe.

2. Versuch. Das Quecksilber in der Röhre B stehe noch 76 cm höher, als in A. In A sei zwischen dem Hahn und dem Quecksilber ein Zwischenraum von 10 cm. Schließen wir nun den Hahn H_1, so ändert sich weiter nichts. Die eingeschlossene Luft vermag also, obwohl in sehr geringer Menge vorhanden, denselben Druck auszuüben, wie die freie Luft. Wenn wir dann aber den Hahn H_2 langsam öffnen, so sinkt das Quecksilber in B, während es in A steigt; stellen wir dann die Röhre B so hoch ein, dass die eingeschlossene Luft nur mehr 5 cm der Röhre füllt, so ist die Höhendifferenz der beiden Quecksilberkuppen in A und B wieder dieselbe wie früher; wir wissen aber aus dem ersten Versuch, dass nun nebst einer 76 cm hohen Quecksilbersäule noch ein ebenso großer Atmosphärendruck auf der eingeschlossenen Luftmenge lastet und sehen also, dass bei doppeltem Druck das Volumen der Luft auf die Hälfte gesunken ist.

Das Product von Druck und Volumen $p \cdot v = 2p \cdot \frac{v}{2}$ ist also dasselbe geblieben wie früher.

3. Versuch. Lassen wir nun den Hahn H_1 geschlossen und H_2 offen, so dehnt sich die in A enthaltene Luftmenge allmählich wieder aus, wenn wir die Röhre B immer tiefer stellen. Steht schließlich das Quecksilber in A höher als in B und beträgt die Höhendifferenz nur mehr die Hälfte des ursprünglichen Barometerstandes, so ist der lufterfüllte Raum in A bereits 20 cm lang und daher doppelt so groß als ursprünglich, während die Hälfte des atmosphärischen Luftdruckes durch die in der Röhre A enthaltene Quecksilbersäule aufgehoben wird. Auch in diesem Falle ist das Product $pv = \frac{p}{2} \cdot 2\,v$ trotz der Druck- und Volumveränderung gleich groß geblieben. Ebenso könnte man die Unveränderlichkeit dieses Wertes für andere Druck- und Volumsverhältnisse nachweisen.

Um nun den atmosphärischen Druck als den Bodendruck der unsere Erde bedeckenden Luftschichten auffassen zu können, müssen wir noch zeigen, dass auch die luftförmigen Körper der Schwerkraft unterworfen sind und dass für sie auch das archimedische Princip giltig bleibt.

Wenn wir ein größeres ballonförmiges Gefäß von bekanntem Volumen möglichst luftleer machen und dann sein Gewicht bestimmen, so können wir, nachdem beim Öffnen des Gefäßes die Luft wieder eingetreten ist, aus der Gewichtszunahme das auf jeden cm^3 entfallende Gewicht berechnen.

Auf diesem Wege lässt sich zeigen, dass bei 0° C und 76 cm Barometerstand das Gewicht eines Liters Luft 1·293 g, also das eines cm^3 Luft 0·001293 g beträgt. Damit ist auch schon die Existenz des Auftriebes gezeigt, denn der luftleere Ballon war, abgesehen von der Dicke der Wände, so vielmal um 1·293 g leichter, als der gefüllte Ballon dm^3

Luft enthält. Damit ist zugleich das specifische Gewicht der Luft in Bezug auf das Wasser festgestellt.

Die Dichte anderer Gase pflegt man dagegen nicht auf die Dichte des Wassers als Einheit zu beziehen, sondern auf die Dichte der Luft bei 0° *C* und 76 cm Barometerstand. Auf die Luftdichte als Einheit bezogen, ist dann die Dichte von

Wasserstoff	0·0692	Stickstoff	0·971
Sauerstoff	0·1051	Kohlensäure	1·526
Knallgas	0·415	Chlor	2·448
Wasserdampf	0·622	Wasser	773·4

Aus diesen Zahlen ergeben sich die auf Wasser bezogenen Werte durch Multiplication mit 0·001293.

Das Barometer.

Zur Bestimmung des Luftdruckes bedient man sich des Torricelli'schen Versuches und pflegt den Druck in „mm Quecksilber“ auszudrücken. Die verbreitetsten zur ständigen Beobachtung des Luftdruckes und seiner Veränderungen dienenden Barometerconstructionen sind die folgenden:

1. Das Birnbarometer (Fig. 112) besteht aus einer nahezu ein Meter langen, oben geschlossenen Glasröhre, die unten in ein birnförmiges Gefäß mündet, welches die freie Oberfläche des Quecksilbers enthält. Von dieser aus muss die Höhe der Quecksilbersäule gemessen werden. Da aber diese Oberfläche immer sinkt, so oft der Luftdruck steigt und umgekehrt, so ist der Ausgangspunkt der Messung nicht unveränderlich, und doch ist die beim oberen Quecksilberniveau angebrachte Scala auf einen festen Ausgangspunkt bezogen. Diese Ungenauigkeit, die dem sogenannten „Wetterglase“ anhaftet, kommt aber wenig in Betracht, weil die untere Oberfläche meist gegen 100mal größer ist als die obere und daher die Hebungen und Senkungen eben sovielmal kleiner ausfallen als im Gebiete der Scala.

Fig. 112. Fig. 113. Fig. 114.

2. Beim Heberbarometer (Fig. 113) hat die Quecksilbersäule überall denselben Querschnitt, und daher sind auch die Schwankungen in beiden Röhrentheilen gleich groß. Man muss daher vor jeder Ablesung die untere Oberfläche auf den Nullpunkt der Scala einstellen. Zu diesem Zwecke kann man entweder die neben der Glasröhre angebrachte Scala verschieben oder man verschiebt die Barometerröhre selbst, bis die untere Quecksilberoberfläche mit dem Nullpunkte der Scala übereinstimmt, und liest dann erst den Barometerstand ab.

3. Das Fortin'sche Gefäßbarometer (Fig. 114) besteht aus einer geraden, in einer Messinghülse eingeschlossenen Glasröhre, die unten

in ein Gefäß mit verschiebbarem Boden mündet. Der Deckel des Gefäßes besitzt eine kleine Öffnung, durch welche die Luft eindringt und trägt eine gegen die Quecksilberoberfläche gerichtete Elfenbeinspitze, welche den Nullpunkt der auf der Messinghülle aufgetragenen Scala bildet. Vor der Ablesung verschiebt man nun den Boden, der aus Leder hergestellt ist, mittels der unten angebrachten Schraube so lange, bis die Elfenbeinspitze ihr Spiegelbild im Quecksilber gerade berührt. Für die Messung ist die höchste Stelle der gekrümmten Quecksilberkuppe maßgebend. Am Barometer ist meist noch ein Thermometer angebracht, weil die Ablesung des Barometerstandes auch von der Temperatur abhängig ist, und der Einfluss derselben in einer Correction berücksichtigt werden muss.

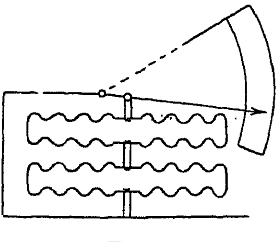


Fig. 115.

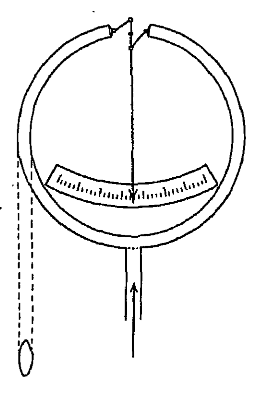


Fig. 116.

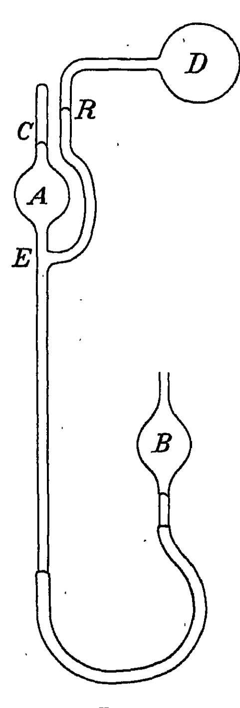


Fig. 117.

4. Apparate, die zur Messung der Luftdruckveränderungen dienen, ohne dass bei denselben Quecksilber in Verwendung käme, bezeichnet man als A n e r o i d e.

Das A n e r o i d b a r o m e t e r v o n V i d i (Fig. 115) besteht im wesentlichen aus einer oder mehreren luftverdünnten Dosen, deren obere und untere Grundfläche concentrische Wellenformen zeigt, wodurch dieselben biegsamer werden. Bei zunehmendem Luftdrucke werden nun diese gewellten Platten in der Richtung der Achse mehr zusammengepresst und diese Verschiebung wird durch einen Hebel auf einen Zeiger übertragen. Notiert man nun auf der beim Zeiger angebrachten Scala die Barometerstände, die den verschiedenen Zeigerstellungen entsprechen, so erhält man ein empyrisch geaichtes Barometer. Die Richtigkeit seiner Angaben muss allerdings zeitweilig durch Vergleichung mit einem Quecksilberbarometer controliert werden. Dagegen hat es diesem gegenüber den Vorzug, dass es viel kleiner ist, dass es in jeder Stellung richtig zeigt und viel leichter transportabel ist.

5. Zur Messung größerer Druckwerte, wie sie in Dampfkesseln auftreten, bedient man sich des M a n o m e t e r s v o n B o u r d o n (Fig. 116). Der wesentlichste Theil desselben ist eine geschlossene, ringförmig gebogene Röhre mit ovalem Querschnitt. Diese Röhre setzt man mit dem Raume in Verbindung, in dem der zu messende Druck herrscht. Da nun der Hohlraum einer solchen Röhre zunimmt, wenn ihre Krümmung abnimmt, so gibt der durch diese Bewegung in Drehung versetzte Zeiger auf einer empyrisch geaichten Scala den meist in Atmosphären gemessenen Druck an.

Um größere Druckwerte zu bestimmen, kann man auch das Volumen der in einer cylindrischen Röhre eingeschlossenen Luft benützen. Dem Mariotte'schen Gesetze zufolge deutet dann das bis zur Hälfte verminderte Volumen auf 2, 1/3 des ursprünglichen Volumens auf 3, $1/n$ auf n Atmosphären Druck. Ist der zu messende Luftdruck sehr

gering, so verwendet man ein Barometer, dessen geschlossener Schenkel wie auch der offene nur wenige cm lang ist. Um endlich hochgradige Luftverdünnungen zu messen, bedient man sich des Vacuummeters (Fig. 117). Die Röhre R steht einerseits mit dem Raume D in Verbindung, in welchem die Verdünnung gemessen werden soll, andererseits mündet sie in die Röhre E und verbindet daher den Raum D mit dem Gefäße A und dem oben geschlossenen Ansatze C. Die Röhre E ist durch einen Schlauch mit dem Gefäße B verbunden und mit Quecksilber gefüllt. Herrscht nun in D ein sehr geringer Luftdruck, so steht das Quecksilber in E nahezu um den Barometerstand höher als in B. Es befinde sich aber noch unterhalb E. Dann herrscht in A dieselbe Verdünnung wie in D. Hierauf wird durch Heben des Gefäßes B das Quecksilber so hoch eingestellt, dass es in die Röhre C eindringt. Ist nun der Hohlraum im Ansatze $C\,1/n$ von dem in A und steht das Quecksilber in der Röhre R z. B. um 1 cm höher als in C, so wissen wir, dass das $n$fache von dem zu messenden Drucke erst einem Barometerstande von 1 cm entspricht, denn durch die $n$fache Verminderung des Volumens in A ist der Druck in C auf das $n$fache gestiegen. Ist also der Raum in C 1/1000 von dem in A, so entspricht der Barometerstand im Raume D einem Tausendtel vom Höhenunterschied in C und R. Auf diesem Wege kann man noch sehr geringe Bruchtheile von „mm" Barometerstand ablesen, also Verdünnungen messen, die dem absoluten Vacuum sehr nahe kommen.

Der Luftballon.

Den Auftrieb, den alle Körper dadurch erleiden, dass sie eine ihrem Volumen entsprechende Luftmenge verdrängen, kann man durch Vergrößerung des Volumens derart steigern, dass mit Hilfe des aërostatischen Auftriebes namhafte Lasten gehoben werden können. Bei dem ersten von den Gebrüdern Montgolfier gemachten Versuche wurde dies durch Erwärmung der in ihm enthaltenen Luft erreicht. Er fand am 5. Juni 1783 zu Vivarais statt, aber damals wagte es noch niemand, dem Luftballon sein Leben anzuvertrauen. Die ersten Luftschiffahrer waren Pilastre de Rozier und Marquis d'Arlandes, welche am 21. October 1783 mit einem freien Ballone in Paris aufstiegen und nach einer etwa 8 Kilometer langen Fahrt bei Fontainebleau landeten. Obwohl die Füllung der Ballone mit Leuchtgas weniger Kosten verursacht, eignet sich doch das Wasserstoffgas, das ja 14mal leichter ist als die atmosphärische Luft, in vieler Hinsicht besser, da jeder m^3 Luft 1·29 kg und ein m^3 Wasserstoff 0·09 kg wiegt. Wenn also auch nicht vollkommen reines Wasserstoffgas verwendet wird, der Barometerstand unter 76 cm und die Temperatur über $0^0\,C$ steht, so kann man doch für jeden m^3 einen Auftrieb von rund 1 kg rechnen. Die Gleichgewichtsbedingungen ändern sich aus verschiedenen Gründen mit zunehmender Höhe sehr rasch und erfordern in der Handhabung der wenigen Regulierungsmittel, wie z. B. Auswerfen von Sand, Öffnen der Ventile u. s. w. die größte Vorsicht. Der Ballon sucht natürlich diejenige Höhe auf, in der der Auftrieb gerade dem Gesammtgewichte des Ballons gleich ist. Die beim Steigen und vorübergehenden Sinken angenommenen Geschwindigkeiten, sowie auch die verschiedenen Luftströmungen, denen der Ballon fast machtlos preisgegeben ist, lassen den Weg, den er einschlägt, noch immer als ein Spiel des Zufalles erscheinen.

Während es also bei der Luftschiffahrt mit dem freien Ballon noch nicht gelungen ist, die statischen Gleichgewichtsverhältnisse durch dynamische Einflüsse zu beherrschen, ist der Vogelflug fast ausschließlich dynamischen Charakters und zeichnet sich gerade deshalb durch seine große Beweglichkeit und Geschwindigkeit aus.

Die barometrische Höhenmessung.

Schon bald nach der Erfindung des Barometers lernte man den Unterschied kennen zwischen den Veränderungen, denen der Barometerstand an einem und demselben Orte unterworfen ist, und der Verschiedenheit des Durchschnitts-Barometerstandes in verschiedenen Gegenden. Es ist klar, dass der Luftdruck an einem Orte umso kleiner ist, je geringer die Höhe der über ihm ruhenden Luftschichte ist, also je höher der Ort über dem Meere liegt. Um aber den Höhenunterschied aus dem Barometerstande zu berechnen, muss man das Gesetz kennen, nach welchem der Luftdruck mit zunehmender Höhe abnimmt.

Denken wir uns die Atmosphäre in lauter horizontale Schichten, jede von 1 m Höhe zerlegt, so können wir innerhalb derselben die Dichte und den Druck als annähernd constant auffassen, während er von Schichte zu Schichte abnimmt. Bezeichnen wir den Barometerstand unmittelbar über dem Meeresniveau mit b_0, einen Meter höher mit b_1, 2 Meter höher mit b_2 u. s. f., in der Höhe von n Metern mit b_n, und die Dichte in diesen Höhen beziehungsweise mit $s_0, s_1, s_2 \ldots\ldots s_n$,

so besteht zunächt die Proportion $s_0 : s_1 = b_0 : b_1$ und aus ihr folgt $s_1 = b_1/b_0 \,.\, s_0$

Für die nächst höhere Schichte gilt $s_1 : s_2 = b_1 : b_2$ und $s_2 = b_2/b_1 \,.\, s_1$

ebenso $s_2 : s_3 = b_2 : b_3$ und $s_3 = b_3/b_2 \,.\, s_2$

u. s. w.

Daher ist dann $s_2 = b_2/b_1 \,.\, s_0\, b_1/b_0 = b_2\, s_0/b_0$

$s_3 = b_3/b_2 \,.\, s_0\, b_2/b_0 = b_3\, s_0/b_0$ u. s. w. Allgemein $s_n = b_n\, s_0/b_0$

Andererseits entspricht einer Flüssigkeitsschichte von 1 Meter Höhe bei einem specifischen Gewichte von $s_0 = 0{\cdot}001293$ der Bodendruck $h s_1 = 1 \,.\, 0{\cdot}001293$ und dieser ist so groß wie der einer Quecksilbersäule von der Höhe $b_0 - b_1$, also gleich $(b_0 - b_1)\,\sigma$, wo σ die Dichte des Quecksilbers bedeutet, weshalb

$$(b_0 - b_1)\,\sigma = h s_1 \text{ und } b_0 = b_1 + h s_1/\sigma = b_1 + h s_0/\sigma \,.\, \frac{b_1}{b_0} = b_1\left(1 + \frac{h\, s_0}{\sigma\, b_0}\right)$$

$$\text{ebenso ist } (b_1 - b_2)\,\sigma = h s_2 \text{ und } b_1 = b_2 + h s_2/\sigma = b_2 + h s_0/\sigma \,.\, \frac{b_2}{b_0} = b_2\left(1 + \frac{h\, s_0}{\sigma\, b_0}\right)$$

$$b_2 = b_3 + h s_3/\sigma = b_3 + h s_0/\sigma \,.\, \frac{b_3}{b_0} = b_3\left(1 + \frac{h\, s_0}{\sigma\, b_0}\right)$$

Mithin bestehen die Gleichungen

$$b_0 = b_1\,(1 + h s_0/\sigma b_0) = b_2\,(1 + h s_0/\sigma b_0)^2 = b_3\,(1 + h s_0/\sigma b_0)^3$$

oder allgemein

$$b_0 = b_n\,(1 + h s_0/\sigma b_0)^n$$

Wenn wir diese Gleichung logarithmieren, so erhalten wir

$$\log b_0 - \log b_n = n \log\,(1 + h s_0/\sigma b_0)$$

Daraus können wir nun die Zahl n der je 1 Meter hohen Schichten, also auch die in Metern gemessene Höhe H berechnen

$$n = \frac{1}{\log\left(1 + \frac{h\, s_0}{\sigma\, b_0}\right)}\,(\log b_0 - \log b_n)$$

In diesem Ausdrucke ist also $h = 1$ und $s_0/\sigma b_0 = 0{\cdot}001293 : 10{\cdot}33 = 0{\cdot}0001251$, wobei $b_0 = 0{\cdot}76$ m.

Da nun $1 : \log 1{\cdot}0001251 = 18400$,

so ergibt sich die zur Bestimmung des Höhenunterschiedes verwendete Formel

$$H = 18400\,(\log b_0 - \log b_n)$$

Viel rascher gelangt man zum gleichen Resultate durch Anwendung des folgenden allgemein giltigen Satzes: Wenn die Änderung einer Größe der geänderten Größe proportional ist, wenn also $g_0 - g_1 = g_1 . \varkappa \lambda$, wobei λ eine unveränderliche Zahl und $\varkappa$ der Proportionalitätsfactor ist, so folgt $g_0 = g_n . e^{n \varkappa \lambda}$, wenn n die Zahl der Änderungen und $e = 2{\cdot}71828$ die Basis des natürlichen Logarithmensystems bedeutet.

Aus $g_0 - g_1 = g_1 \varkappa \lambda$ folgt nämlich $g_0 = g_1 (1 + \varkappa \lambda)$, $g_1 = g_2 (1 + \varkappa \lambda)$, $g_2 = g_3 (1 + \varkappa \lambda), \ldots$ und $g_0 = g_1 (1 + \varkappa \lambda) = g_2 (1 + \varkappa \lambda)^2 = g_3 (1 + \varkappa \lambda)^3 =$

$$\ldots = g_n (1 + \varkappa \lambda)^n = g_n \left(1 + \frac{1}{1/\varkappa\lambda}\right)^{\frac{1}{\varkappa\lambda} . \varkappa\lambda . n} = g_n . e^{n \varkappa \lambda}, \text{ denn } \left(1 + \frac{1}{1/\varkappa\lambda}\right)^{\frac{1}{\varkappa\lambda}}$$

nähert sich umsomehr dem Werte $e = 2{\cdot}71828$, je größer der Wert $\frac{1}{\varkappa\lambda}$ wird.

Da in unserem Falle $b_0 - b_1 = b_1 \frac{h s_0}{\sigma b_0}$, so können wir $h = \varkappa = 1$ und $\lambda = \frac{s_0}{\sigma b_0} = 0{\cdot}0001251$ setzen; dann ist $\frac{1}{\varkappa\lambda} = \frac{1}{\lambda} = 8000$, also ein hinreichend großer Wert, um die Gleichung aufzustellen $b_0 = b_n \, e^{n . 0{\cdot}0001251}$. Daher ist dann $\log b_0 - \log b_n = n . 0{\cdot}0001251 \log e$ und

$$n = \frac{1}{0{\cdot}0001251 \times 0{\cdot}43429} (\log b_0 - \log b_n) = 18400 (\log b_0 - \log b_n)$$

Diese Formel für die barometrische Höhenmessung ist im Vergleiche zur trigonometrischen Messung insoferne vortheilhaft, als sie mit einfacheren Mitteln und viel geringerer Mühe rasch zum Ziele führt. Dagegen ist sie nicht so genau, und einzeln vorgenommene Messungen werden oft allzusehr durch unvermuthete Temperaturschwankungen und Luftströmungen im ungünstigen Sinne beeinflusst.

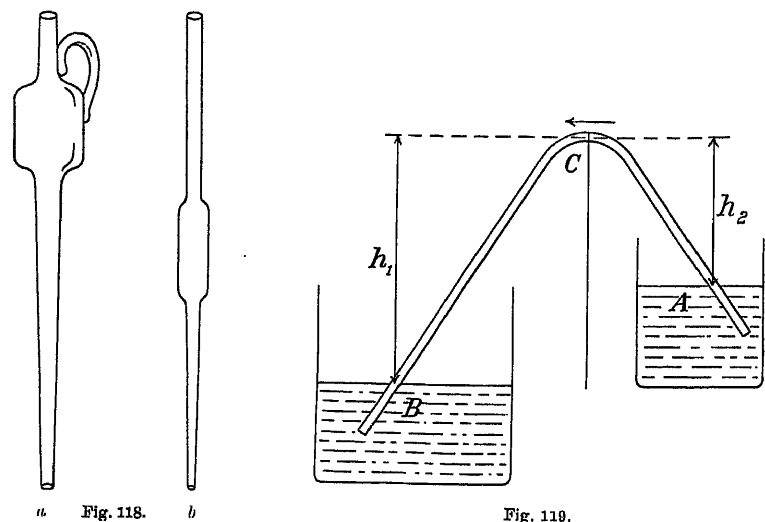
Das Dalton'sche Gesetz über den Druck in einem Gasgemisch.

Befinden sich in einem geschlossenen Raume mehrere Gase, die sich in chemischer Hinsicht gegenseitig nicht beeinflussen, so ist der Gesammtdruck der Gasmischung gleich der Summe jener Druckwerte, welche jedes Gas ausüben würde, wenn es in diesem Raume allein vorhanden wäre. Schließen wir z. B. in einem Raume eine bestimmte Menge atmosphärischer Luft ab, bei der auf 100 Volumtheile 21 Theile Sauerstoff, etwas über 78 Theile Stickstoff und nahezu 1 Theil Argon entfallen, so würde dieselbe Menge Sauerstoff bei einem Gesammtdruck von 76 cm Barometerstand in diesem Raume nur einen Druck von 21/100 . 76 = 16 cm zeigen, der Stickstoff dagegen einen Druck von 78/100 . 76 = 59 cm und Argon nahezu 1 cm Barometerstand ausüben. Jeden solchen Antheil am Gesammtdruck bezeichnet man dann als Partialdruck. Nehmen wir eines der Gase aus der Mischung weg, wie es z. B. geschieht, wenn in dieser abgeschlossenen Luftmenge ein hinreichend großes Stück Phosphor verbrennt, so weist die zurückbleibende Gasmischung nur mehr einen Druck von etwa 60 cm Quecksilber auf. Daraus folgt eben, dass der Partialdruck des Sauerstoffes 16 cm beträgt. und dass auf 100 Volumtheile Luft 100 . 16/76 = 21 Volumtheile Sauerstoff entfallen.

Anwendungen der Hydromechanik und Aëromechanik.

Bei den folgenden im Laboratorium wie auch im praktischen Leben vielfa verwendeten Vorrichtungen kommen sowohl die auf die Hydromechanik, wie auf d Aëromechanik sich beziehenden Naturgesetze in Anwendung.

Stechheber und Pipette. Wenn man den Stechheber (Fig. 118a) in eine Flüssi keit eintaucht oder dieselbe mit Hilfe der Pipette (Fig. 118b) aufsaugt und dann d obere Öffnung schließt, so fließt durch die untere Öffnung die Flüssigkeit nicht eher au bevor man nicht auch die obere Öffnung aufmacht. Dem Bodendruck der Flüssigkeit hä nämlich der atmosphärische Luftdruck das Gleichgewicht und die Capillarerscheinunge an der Ausflusstelle verhindern es, dass hier die Flüssigkeit gleichzeitig austrete und Luft in die Röhre eindringen kann, wie es bei einer sehr großen Öffnung der Fall wär



a Fig. 118. b

Fig. 119.

Der Saugheber (Fig. 119) besteht aus einer winkelförmig gekrümmten Röhre, di mit ihrem kürzeren Schenkel in ein mit Flüssigkeit gefülltes Gefäß A getaucht wir während der längere entweder frei oder in einer Flüssigkeit B mit tiefer gelegene Oberfläche mündet. Auf der einen Seite der höchsten Stelle C des Hebers ist de Druck in der Röhre gleich dem Barometerstande b, weniger dem Bodendrucke eine Flüssigkeitssäule von der Höhe h_2. Auf der anderen Seite ist der Druck gleich der Barometerstande b, weniger dem Bodendrucke h_1 einer längeren Flüssigkeitssäule, un ist daher kleiner als auf der ersten Seite. Infolgedessen wird die Flüssigkeit nich nur an der Stelle C in der Richtung des Pfeiles fortgeschoben, sondern es tritt in de ganzen Röhre eine continuierliche Strömung in diesem Sinne ein, so lange bei C dies Druckdifferenz besteht.

Die Mariotte'sche Flasche (Fig. 120). Wird dieselbe bis zur Höhe h über der Aus flussöffnung A mit Wasser gefüllt und die durch den Hals der Flasche gehende Röhre reicht bis zur Höhe x oberhalb A, so sehen wir, dass aus der Flasche weder Wasse ausfließt noch Luft in dieselbe eindringt, wenn $x = O$, wenn also die Röhre R in de Höhe der Ausflussöffnung mündet. Der Bodendruck des Wassers ist also bei A gleic dem Barometerstande b und oberhalb der h cm hohen Wassersäule gleich $b - h$. Hebe wir nun die Röhre R um die Strecke x, so herrscht in dieser Höhe zuerst der Druc $b - x$, weshalb sofort von oben durch die Röhre Luft eindringt, bis der Druck hie auf b gestiegen ist. Gleichzeitig aber wird dann auch bei A der Druck um x steige und daher das Wasser unter einem Drucke ausfließen, als ob die Mariotte'sche Flasch oben offen und nur bis zur Höhe x mit Wasser gefüllt wäre. Man kann also durc Verschieben der Röhre R die Ausflussgeschwindigkeit so regulieren, dass sie dauern einer beliebigen Flüssigkeitshöhe x entspricht, bis das Wasser unter O gesunken ist

Saug- und Druckpumpe haben den Zweck, in einer geschlossenen Röhrenleitun das Wasser in bestimmter Richtung in Bewegung zu versetzen. In beiden Fällen steig das Wasser im Saugrohr S infolge des äußeren Luftdruckes, nachdem durch das Hebe

des Kolbens im Stiefel ein luftverdünnter Raum hergestellt wurde. Hat bei der Saugpumpe (Fig. 121 a) das Wasser das erste Ventil V_1 passiert, so dringt es beim Niedergang des durchbrochenen Kolbens auch durch das zweite Ventil V_2 und strömt dann beim nächsten Hub durch die Ausflussöffnung ab. Bei der Druckpumpe

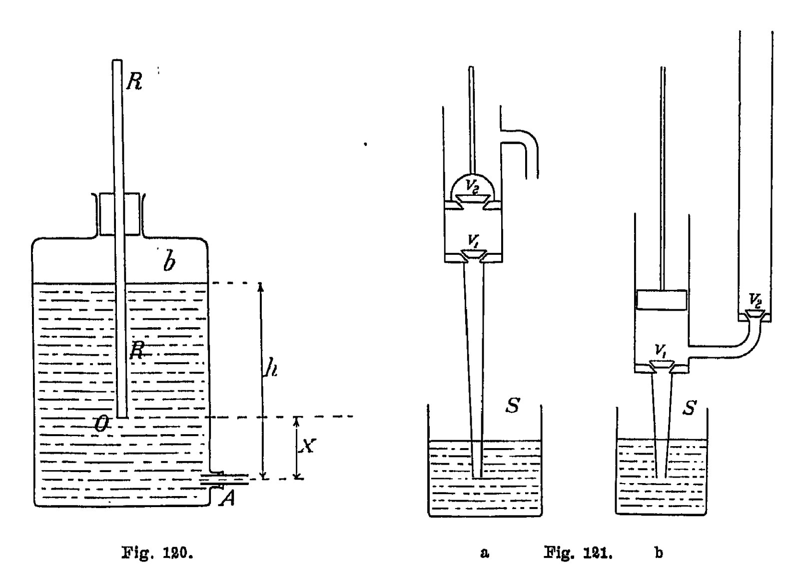


Fig. 120. a Fig. 121. b

(Fig. 121 b) dagegen wird das Wasser vom Stiefelraume aus mit dem massiven Kolben durch das zweite Ventil V_2 hindurch in das Steigrohr gedrückt und kann hier der Kraft der Kolbenbewegung entsprechend hoch gehoben werden. Während also bei der Saugpumpe die Hauptarbeit immer nur beim Heben des Kolbens geleistet wird, muss bei der Druckpumpe die zur Hebung des Wassers im Steigrohr nöthige Arbeit beim Niedergang des Kolbens geleistet werden. Die Saugpumpe wird also nur angewendet, wenn das Wasser weniger als 10 m hoch gehoben werden soll und die Hebungsarbeit am oberen Ende des Brunnenschachtes geleistet wird. Soll das Wasser höher als 10 m gehoben werden, so muss eine Druckpumpe angewendet werden und die Triebkraft muss am Fuße der Wassersäule thätig sein.

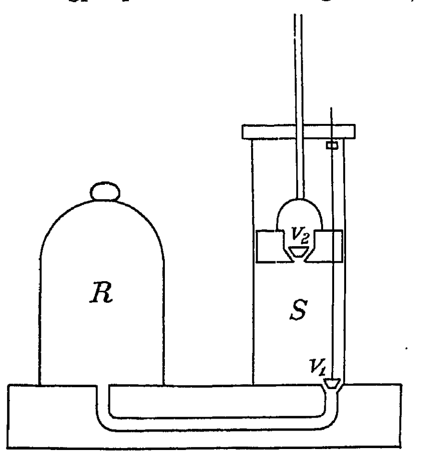


Fig. 122.

Die Luftpumpen. Bei der einstiefeligen Luftpumpe (Fig. 122) steht der Recipient R, in dem die Luft verdünnt wird, durch einen Canal mit dem Stiefelraum S in Verbindung und kann durch ein am Boden des Stiefels angebrachtes Ventil V_1 verschlossen werden. Beim Heben des Kolbens wird dieses Ventil durch die Reibung an der damit verbundenen Stange etwas geöffnet und somit der Raum im Recipienten R um den des Stiefels S erweitert. Dies ist mit einer Verdünnung der Luft im Verhältnis $v = R : (R + S)$ verbunden. Beim Niedergang des Kolbens entweicht die comprimierte Luft durch das im Kolben angebrachte Ventil V_2, während das Ventil V_1 unterdessen geschlossen bleibt. Nach n Kolbenzügen ist die Verdünnung bis zum Betrage v^n vorgeschritten. Da man aber beim Niedergang des Kolbens nie die ganze Luft zu entfernen vermag, so breitet sich die im „schädlichen Raum“ zurückbleibende Luft immer wieder im

Stiefelraum aus und gestattet daher nicht, dass die Verdünnung im Recipienten ohne Grenzen zunehme.

Der gelehrte Bürgermeister von Magdeburg, Otto von Guericke, baute um das Jahr 1650 nicht nur die ersten brauchbaren Luftpumpen, sondern stellte auch mit Hilfe derselben eine Reihe von wissenschaftlich interessanten Versuchen an. Besonders be-

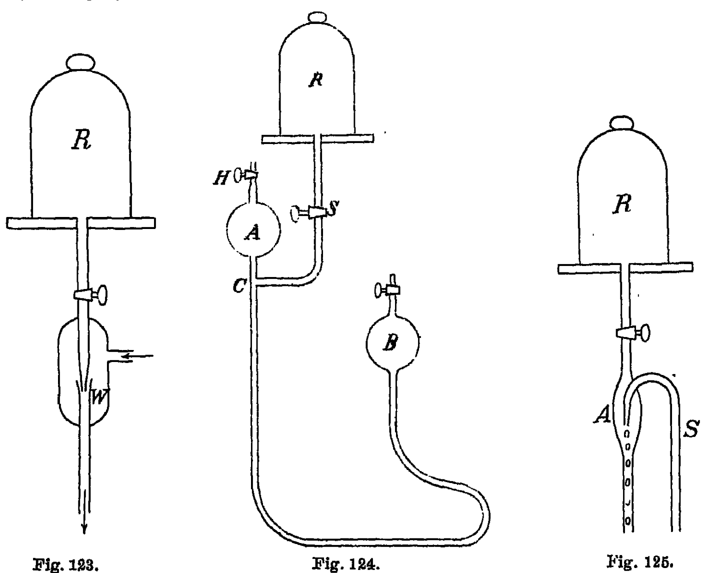


Fig. 123. Fig. 124. Fig. 125.

kannt wurde der Versuch mit den beiden „Halbkugeln", die vom Luftdruck zusammengehalten, selbst durch Anwendung mehrerer Pferdekräfte nicht auseinandergerissen werden konnten.

Zur Herstellung geringerer Verdünnungen verwendet man die **Wasserstrahlpumpe** (Fig. 123). Da in einer Röhre, durch welche Wasser fließt, der Druck um so geringer ist, eine je größere Geschwindigkeit das Wasser besitzt, so verbindet man bei der Wasserstrahlpumpe den Recipienten *R* mit jener Stelle *W* im ausfließenden Wasserstrahl, wo durch die Verminderung des Querschnittes die Geschwindigkeit wesentlich gesteigert und daher der hydrostatische Druck am meisten vermindert wird. Infolgedessen strömt die Luft vom Recipienten dorthin und wird vom Wasser mitfortgerissen. Auf diesem Wege kann selbst in größeren Räumen die Luft sehr rasch bis auf wenige cm Quecksilber verdünnt werden.

Um hochgradig luftverdünnte Räume herzustellen, bedient man sich der verschiedenen **Quecksilberluftpumpen.** Bei der Geißler'schen Pumpe (Fig. 124) wird im Gefäße *A* durch Senken des Gefäßes *B* ein torricellisches Vacuum hergestellt, welches dann mit dem Recipienten *R* durch den Hahn *S* in Verbindung gesetzt wird, sobald das Quecksilber unter die Stelle *C* gesunken ist. Wenn man das Gefäß *B* wieder hebt, so wird zuerst der Raum *A* mit der aus dem Recipienten gekommenen Luft von diesem abgetrennt und mit Quecksilber gefüllt, bis der letzte Rest von Luft durch den offenen Hahn *H* entwichen ist. Da hier also kein schädlicher Raum auftritt, so kann durch oftmalige Wiederholung dieses Vorganges die Verdünnung viel weiter getrieben werden, als bei der Kolbenluftpumpe.

Bei der Sprengel'schen Pumpe (Fig. 125) lässt man das Quecksilber durch eine Röhre *S* in das nach unten trichterförmig sich verengende Gefäß *A* träufeln, welches mit dem Recipienten *R* in Verbindung steht. Zwischen je zwei Tropfen, die durch die Röhre bei *A* niedersteigen, drängt sich eine zunächst dem Gefäße *A* und damit auch dem Recipienten *R* entnommene Luftmenge und wird hierauf vom Quecksilber mitgenommen. Wenn der größere Theil der zuerst im Recipienten enthaltenen Luft durch eine Wasserstrahlpumpe entfernt worden ist, so erreicht man auch mit dieser Pumpe sehr bald eine hochgradige Verdünnung.

Die Compressionspumpe (Fig. 126) besteht aus einem cylindrischen Stiefel S mit luftdicht schließendem Kolben K; ein Ventil V sorgt dafür, dass aus R die Luft nicht mehr zurückströmen kann. Nachdem man den Kolben bis über die Öffnung A zurückgezogen hat, durch welche die Luft in den Stiefelraum eindringt, verdichtet man hier die Luft durch das Hineindrücken des Kolbens so lange, bis die comprimierte Luft das Ventil öffnet und in den Raum R eindringt.

Die Wasserstrahlpumpe lässt sich auch zur Verdichtung der Luft, beziehungsweise zur Erzeugung eines dadurch hervorgerufenen Luftstromes verwenden. Wenn man nämlich dafür sorgt, dass die vom Wasserstrahl mitgerissene Luft (Fig. 127) in einen geschlossenen Raum R getrieben wird, während andererseits durch das Saugrohr S immer neue Luft nachfließt, so wird die Luft in R zuerst verdichtet und kann dann, durch eine kleine Öffnung A entweichend, als Gebläse dienen, während das Wasser durch die Röhre B abfließt. Von der Höhe dieser Wassersäule B hängt es auch ab, unter welchem Druck die Luft bei A entweicht.

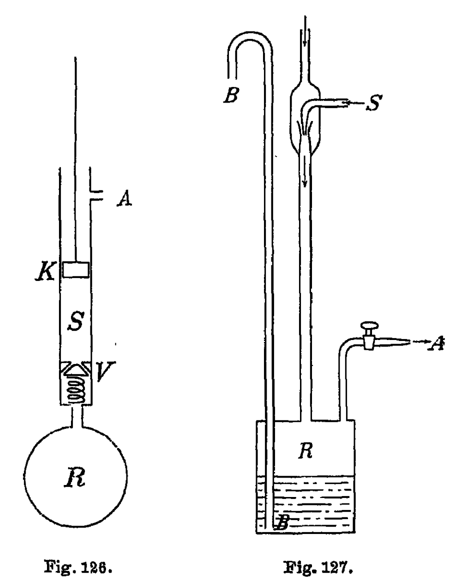


Fig. 126. Fig. 127.

Die Wärme.

Thermometrie.

Ein und dasselbe Wasser, in das wir die Hand tauchen, scheint uns kälter oder wärmer, je nachdem wir die Hand früher in wärmeres oder kälteres Wasser getaucht haben. Die in den obersten Schichten der Haut eingebetteten Tastorgane bringen uns also nicht so sehr die Temperatur, sondern vielmehr die Änderungen der Temperatur zum Bewusstsein.

Die Beurtheilung der Temperatur durch den Tastsinn ist also ungenau und wird um so ungenauer, je mehr wir uns von der Temperatur des menschlichen Körpers entfernen. Um also einen verlässlichen Maßstab für die Beurtheilung der Temperatur zu erhalten, müssen wir uns nach einer anderen Erscheinung umsehen, die sich sowohl der Genauigkeit als auch dem Umfange nach zur Messung besser eignet, und eine solche ist die Ausdehnung der festen, flüssigen und gasförmigen Körper.

Eine Metallkugel, die im kalten Zustande durch einen Ring gerade noch durchgeschoben werden kann, bleibt erwärmt in demselben stecken. Umgekehrt kann man es erreichen, dass die Kugel, die im kalten Zustande durch einen Ring nicht hindurchgeht, denselben passiert, wenn man nur den Ring, nicht aber die Kugel erwärmt. Wird ein Metallstab, dessen eines Ende festgeklemmt ist, stark erhitzt, so verschiebt sich das andere und gestattet durch Verbindung mit einem Hebelwerke die Ausdehnung deutlich sichtbar zu machen.

Wenn wir eine hohle Glaskugel, die in eine enge Röhre ausläuft, mit Wasser oder Quecksilber füllen und mit der Hand erwärmen, so schreitet die Flüssigkeitsgrenze in der Richtung gegen das offene Ende der Röhre hin vor-

wärts; sobald aber die Flüssigkeit einen bestimmten Punkt erreicht hat, vermag die Wärme der Hand keine weitere Ausdehnung mehr zu erzielen, weil diese Ausdehnung nur von der Temperatur abhängt. Noch stärker zeigt sich diese Erscheinung, wenn wir in der Hohlkugel durch einen in die Röhre gebrachten Quecksilbertropfen eine bestimmte Menge Luft absperren und dann dieselbe erwärmen.

Mit einem derart construierten „Luftthermometer" hatte sich schon Galilei befasst. Aber bereits die von der „Accademia del Cimento" in Florenz (1657—1667) hergestellten Thermometer, die zu den ältesten gehören, bestanden aus einer mit Quecksilber, Wasser oder Alkohol gefüllten, unten kugelförmig erweiterten und oben geschlossenen Röhre. Den Ausgangspunkt der Messung wählte man unter dem Gefrierpunkt des Wassers, und die für die Benützung wichtigen Punkte, wie der Gefrierpunkt des Wassers, die Temperatur des menschlichen Körpers und des siedenden Wassers wurden durch angeschmolzene Glasperlen angedeutet. Erst das Bedürfnis nach vergleichbaren Temperaturangaben legte es nahe, bei der Eintheilung von Punkten auszugehen, deren Richtigkeit immer wieder controliert werden kann. Hiezu wählte man auf Vorschlag eines Mitgliedes jener Accademie, Carlo Renaldini aus Ancona, den Gefrierpunkt und Siedepunkt des Wassers, während Daniel Gabriel Fahrenheit aus Danzig von der denkbar tiefsten Temperatur ausgieng, die er durch eine Mischung von Schnee und Salz herstellen zu können glaubte (1724). Den Unterschied zwischen dieser Temperatur und der des menschlichen Blutes theilte er zuerst in 24 und später jeden derselben noch einmal in 4, also im ganzen in 96 Theile, und erhielt so für den Gefrierpunkt des Wassers die Temperatur von 32° und den Siedepunkt bei 212°. Erst im Jahre 1730 schlug René-Antoine Ferchault de Reaumur die Eintheilung des Intervalles zwischen Gefrierpunkt und Siedepunkt in 80 Grade vor, und der Professor der Astronomie in Upsala, Anders Celsius, verwendete zuerst das 100theilige Thermometer (1742).

Da beim Thermometer nach Fahrenheit der Gefrierpunkt einer Temperatur von 32^0 entspricht, so entfallen 180^0 auf dasselbe Intervall, welches Reaumur in 80^0 und Celsius in 100^0 Theile theilt. Daher ist eine Temperaturdifferenz von 5^0 C gleich einer solchen von 4^0 R oder von 9^0 F.

Ferner ist eine Temperatur von

$$n^0\,C = 4/5\,n^0\,R = (9/5\,n + 32)^0\,F$$
$$n^0\,R = 5/4\,n^0\,C = (9/4\,n + 32)^0\,F$$
$$n^0\,F = 5/9\,(n - 32)^0\,C = 4/9\,(n - 32)^0\,R.$$

Diese sich entsprechenden Temperaturangaben lassen sich auch durch Vergleichung der Scalen (Fig. 128) entnehmen.

Fig. 128.

Zur Bestimmung von Temperaturen, die tiefer unter dem Nullpunkt liegen, verwendet man vielfach mit Alkokol, für höhere Temperaturen dagegen nur mit Quecksilber gefüllte Thermometer.

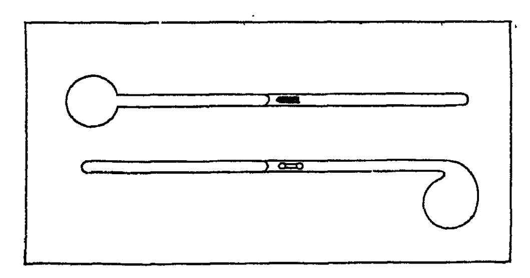


Fig. 129.

Um die höchste und niederste Temperatur zu finden, die innerhalb einer gewissen Zeit an einem bestimmten Orte geherrscht hat, verwendet man die Maximum- und Minimumthermometer (Fig. 129).

Bei ersterem schiebt die Quecksilbersäule ein in der Röhre liegendes Eisenstäbchen vor sich her und dieses bleibt dann dort liegen, wo das Quecksilber bei seiner größten Ausdehnung die höchste Temperatur angezeigt hat. Beim Minimumthermometer zieht der Alkohol vermöge der Adhäsion ein Glasstäbchen so lange in der Richtung gegen die Kugel mit sich zurück, als die Temperatur sinkt, ohne es aber bei steigender Temperatur in entgegengesetzter Richtung wieder mitzunehmen.

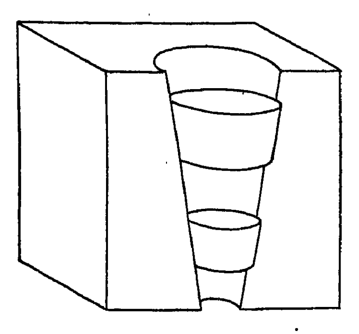


Fig. 130.

Zur Beurtheilung der Temperatur in Hochöfen verwendet man das Pyrometer (Fig. 130). Das Pyrometer beruht auf der Eigenschaft des Töpferthones, bei steigender Temperatur zu „schwinden", d. h. sein Volumen zu vermindern. Man stellt nun kegelstumpfförmige Körper von ganz bestimmter Größe her und vertheilt dieselben an verschiedene Stellen des Hochofens. Nach Vollendung des Hochofenprocesses werden dann die Thonstücke wieder gesammelt und dadurch ausgemessen, dass man sie in einen hohlen Kegel hineingibt, in welchem sie um so tiefer gegen die Spitze vordringen, je geringer ihr Querschnitt geworden ist.

Ausdehnung der Körper durch die Wärme.

Ausdehnung fester Körper. Nachdem wir also mit Hilfe des Thermometers in der Lage sind, Temperaturdifferenzen miteinander zu vergleichen, können wir das Ausdehnungsverhältnis verschiedener Körper messen, das sie bei derselben Temperaturzunahme zeigen. (Fig. 131.) Sind l_t und l_{t+1} die Längen eines Stabes vor und nach einer Temperatursteigerung von 1° C, so bezeichnet man den Wert des Quotienten

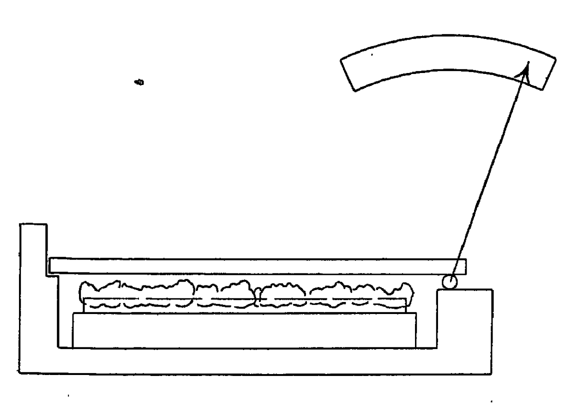


Fig. 131.

$$\frac{l_{t+1} - l_t}{l_t} = \alpha$$

als den linearen Ausdehnungscoefficienten dieses Materiales bei der Temperatur von t^0 C. Bei einer Temperatursteigerung von t^0 C ist also $\frac{l_t - l_0}{l_0} = \alpha\, t$ und $l_t = l_0\,(1 + \alpha\, t)$.

Bei der Bestimmung der Verlängerung $l_t - l_0$ muss man dafür sorgen, dass der Stab seiner ganzen Länge nach dieselbe Temperatur habe. Das erreicht man am besten, indem man ihn z. B. in einem Wasserbade

erwärmt und die Temperatur desselben mit Hilfe eines Thermometers bestimmt. So erhält man als Ausdehnungscoefficienten für

Blei	$0{\cdot}0000285 = 285 \, . \, 10^{-7}$	Zink	$273 \, . \, 10^{-7}$
Silber	$188 \, . \, 10^{-7}$	Eisen	$110 \, . \, 10^{-7}$
Kupfer	$163 \, . \, 10^{-7}$	Glas	$40 \, . \, 10^{-7} - 85 \, . \, 10^{-7}$

Eine Eisenbahnschiene, die bei einer Temperatur von 0^0 C eine Länge von 5 m hat, erreicht nach einer Temperaturzunahme von 20^0 eine Länge von

$$l_{20} = 500\,(1 + 0{\cdot}000011.20) = 500 \, . \, 1{\cdot}00022 = 500{\cdot}11 \text{ cm},$$

wird sich also um 1 mm verlängert haben.

Die Verlängerungen durch die Temperatur müssen bei der Benützung von metallischen Maßstäben, insbesondere auch beim Ablesen des Barometerstandes immer berücksichtigt werden.

Wird die Seite eines Quadrates bei einer Temperatursteigerung um t^0 C

$$l_t = l_0\,(1 + \alpha\, t),$$

so ist der Flächeninhalt

$$f_t = [l_0\,(1 + \alpha\, t)]^2 = f_0\,(1 + 2\,\alpha\, t + \alpha^2\, t^2)$$

und ein Würfel von dieser Seitenlänge wird dann das Volumen

$$v_t = [l_0\,(1 + \alpha\, t)]^3 = v_0\,(1 + 3\,\alpha\, t + 3\,\alpha^2\, t^2 + \alpha^3 t^3)$$

annehmen.

Wenn wir z. B. für eine Glassorte mit dem Ausdehnungscoefficienten $85 \, . \, 10^{-7}$ den auf die Fläche bezogenen Ausdehnungscoefficient $a' = 2\,\alpha$ und daher $f_t = f_0\,(1 + a' t)$, und den auf das Volumen bezogenen Coefficient $a = 3\,\alpha$ setzen, so dass

$$v_t = v_0\,(1 + a\, t),$$

so weicht ersterer a' von $2\,\alpha + \alpha^2\, t$ für $t = 100$ um $7 \, . \, 10^{-9}$ und
letzterer a „ $3\,\alpha + 3\,\alpha^2 t + \alpha^3 t^2$ um $2 \, . \, 10^{-8}$ ab;
wir können daher den doppelten linearen Ausdehnungscoefficienten der Länge für die Flächen- und den dreifachen Wert für Volumsvergrößerung verwerten.

Wenn also eine mit Flüssigkeit gefüllte Glaskugel mit angesetzter Röhre erwärmt wird, so dehnt sich bei der Erwärmung des Glases zuerst der Höhlraum, und zwar um dasselbe Volumen aus, um welches sich ein eben so großer massiver Glaskörper erweitern würde. Infolgedessen scheint sich die Flüssigkeit zuerst zusammenzuziehen. Aber auch bei fortgesetzter Erwärmung bleibt die scheinbare Ausdehnung der Flüssigkeit infolge der gleichzeitigen Ausdehnung des Gefäßes so weit hinter der wahren Ausdehnung zurück, dass wir erstere als die Differenz der wahren Ausdehnung der Flüssigkeit und der des Gefäßvolumens betrachten müssen.

Ausdehnung flüssiger Körper. Um zunächst den wahren Ausdehnungscoefficienten des Quecksilbers zu finden, kann man sich folgender Methode bedienen. Von einer mit Quecksilber gefüllten U-förmigen (Fig. 132) Röhre erhält man den einen Schenkel dauernd auf der Temperatur von 0^0 C, indem man ihn mit Schnee oder Eis umgibt, während man zugleich dafür sorgt, dass das Quecksilber im anderen Schenkel eine höhere Temperatur t^0 beibehält. Dann verhalten sich die in beiden Schenkeln befindlichen Quecksilbermengen wie zwei Flüssigkeiten von verschiedenem specifischen Gewicht, und es besteht die Proportion $h_0 : h_t = s_t : s_0$.

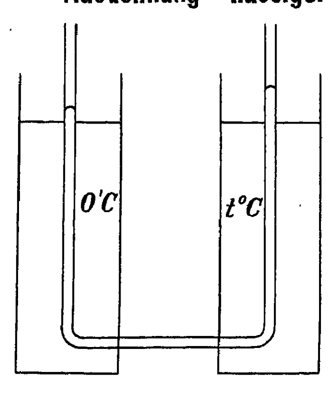


Fig. 132.

Auch ändert sich das Gewicht bei zunehmender Temperatur nicht, und es ist $s_0\, v_0 = s_t\, v_t$,

also $s_0 : s_t = v_t : v_0 = v_0\,(1 + a\,t) : v_0 = (1 + a\,t) : 1$

und daher $h_t : h_0 = (1 + a\,t) : 1$ und $a = \frac{h_t - h_0}{h_0 \,.\, t}$

Mit Hilfe des Ausdehnungscoefficienten des Quecksilbers kann man sich weitere ähnliche Bestimmungen dadurch erleichtern, dass man denselben zur Aichung eines Dilatometers (Fig. 133) benützt. Geben wir demselben die Gestalt einer Kugel, die in eine Capillarröhre ausläuft, so können wir den Rauminhalt für die Temperatur 0° C messen, indem wir das Dilatometer bei 0° C bis zu einer bestimmten Marke v_0 mit Quecksilber füllen, dessen Gewicht bestimmen und daraus das Volumen berechnen. Auf demselben Wege kann man das Volumen eines Theiles der Capillarröhre von v_0 bis v_t und deren Querschnitt q feststellen. Ist a' der Ausdehnungscoefficient des Quecksilbers, a derjenige der zu untersuchenden Flüssigkeit und b der des Glases, so bestehen für eine Temperaturerhöhung um t^0 C die Gleichungen $v'_t - v_0 = l'q = v_0\, t\,(a' - b)$ und

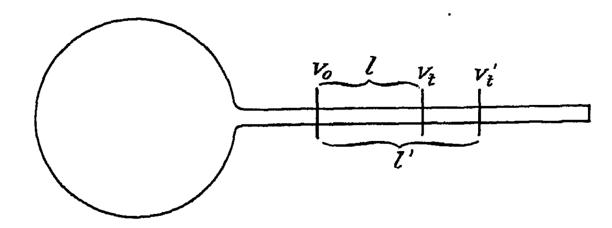


Fig. 133.

$v_t - v_0 = l\,q = v_0\, t\,(a - b)$,

also $(l - l')\, q = (a - a')\, v_0\, t$

und $a = a' + \frac{(l - l')\, q}{v_0\, t}$.

Für Quecksilber ist der Ausdehnungscoefficient bei 10° C $1815 . 10^{-7}$
20° C $1816 . 10^{-7}$
40° C $1817 . 10^{-7}$

Er ist somit nicht für alle Temperaturen gleich und nimmt mit steigender Temperatur etwas zu. Versehen wir den Ausdehnungscoefficenten mit negativem Vorzeichen, wenn das Volumen bei steigender Temperatur abnimmt, so ergibt sich das Verhalten des Wassers bei verschiedenen Temperaturen aus folgenden Angaben:

100°	50°	20°	10°	4°	0°	–10°
0·00077	0·00046	0·00020	0·00009	0·00001	–0·00005	–0·00027

Wenn man nämlich ein Dilatometer mit Wasser füllt, zugleich mit einem empfindlichen Thermometer in ein Gefäß mit Wasser von 0° C gibt und langsam erwärmt, so beobachtet man, wie sich das Wasser zuerst zusammenzieht und ungefähr bei 4° C seinen niedersten Stand einnimmt.

Dieses Verhalten steht beim Wasser keineswegs isoliert da und ist durch die Nähe des Gefrierpunktes bedingt, bei dem ja auch eine Volumenzunahme eintritt. Für das Leben in der Natur ist diese Eigenschaft des Wassers von großer Wichtigkeit. Während sich nämlich die über 4° C erwärmten Wassermassen, dem hydrostatischen Auftriebe folgend, an der Oberfläche sammeln und dadurch ein Vordringen der Wärme nach unten erschweren, steigen unter 4° C die kälteren Wassermengen nach oben und verhindern so nahezu vollständig das Vordringen der Kälte nach unten oder der Wärme des Wassers nach oben. Daher bildet sich auch die Eisschichte zuerst an der Oberfläche und nimmt an Stärke nur sehr langsam zu.

Ausdehnung der Gase. Wenn wir die in einem Dilatometer enthaltene Luft mittelst eines Quecksilbertropfens von der äußeren Luft abschließen, so sehen wir, dass ihr Volumen von der Temperatur, sowie auch vom äußeren Luftdruck abhängt. So lange nun der Druck derselbe bleibt,

dehnt sich die Luft bei zunehmender Temperatur viel stärker aus als alle Flüssigkeiten und es ist $v_t = v_0 (1 + a t)$. Diese Beziehung zwischen Volumen und Temperatur bezeichnet man als das Gay-Lussac'sche Gesetz. Dabei ist $a = 1/273 = 0{\cdot}003665$. Bei einer Temperaturzunahme von 100^0 C ist also $v_{100} = 1{\cdot}3665$, also um mehr als ein Drittel größer als bei der Temperatur von 0^0 C.

Während die Ausdehnungscoefficienten der Flüssigkeiten ziemlich verschiedene Werte aufweisen, haben alle Gase, die vom Übergang in den flüssigen Zustand weit entfernt sind, nahezu denselben Wert. Bedeutet v_0 das Volumen eines Gases bei der Temperatur 0^0 C und 76 cm Barometerstand, so behält also der Ausdruck $v_0 = \frac{v_t}{1 + a t}$ für alle Gase bei jeder Temperatur denselben Wert bei.

Dagegen nimmt das Product pv, das dem Mariotte'schen Gesetz zufolge bei derselben Temperatur immer denselben Wert hat, einen anderen Wert an, wenn die Temperatur steigt oder sinkt.

Bedeuten also p_1, v_1 und t_1 die Werte des Druckes, des Volumens und der Temperatur, wie sie in einem bestimmten Augenblicke an einer Gasmenge gemessen wurden, und p_2, v_2 und t_2 drei andere an derselben Gasmenge beobachtete Werte, so besteht die Gleichung:

$$\frac{p_1 v_1}{1 + a t_1} = \frac{p_2 v_2}{1 + a t_2} = p_0 \cdot v_0,.$$

wo p_0 und v_0 Druck und Volumen bei der Temperatur von 0^0 C sind.

Die so dargestellte Wechselbeziehung zwischen Druck, Volumen und Temperatur nennt man die Zustandsgleichung einer Gasmenge. Sie ist auch unter dem Namen „Mariotte-Gay-Lussac'sches Gesetz" bekannt.

Wegen $a = \frac{1}{273}$ ist $p_0 v_0 = \frac{p v}{1 + a t} = \frac{273 p v}{273 + t} = \frac{273 p v}{T}$

In diesem Ausdrucke bedeutet t die vom Gefrierpunkte des Wassers an gemessene Temperatur und $273 + t = T$ eine ebenfalls in Celsiusgraden ausgedrückte Temperatur, die aber von einem um 273^0 C tieferen Punkte an gezählt wird.

Wir können dann das Mariotte-Gay-Lussac'sche Gesetz auch in der Weise aussprechen, dass wir sagen: $p v = \frac{p_0 v_0}{273} \cdot T$

Diese auf den 273^0 C tieferen Nullpunkt bezogene Temperatur T bezeichnet man als die absolute Temperatur. Sind also p_1 und v_1 Druck und Volumen einer Gasmenge bei der Temperatur T_1 und p_2 und v_2 die der Temperatur T_2 entsprechenden Werte, so besteht also die Proportion $p_1 v_1 : p_2 v_2 = T_1 : T_2$, d. h. das Product aus Druck und Volumen ist der absoluten Temperatur proportional.

Bedeutet endlich m die Masse einer Gasmenge und setzen wir $\frac{p_0 v_0}{273} = mR$, so bezeichnet man $R = \frac{p_0 v_0}{273 \cdot m}$ als die Gasconstante, und es ist also $pv = mRT$.

Sobald man also für ein bestimmtes Gas die Gasconstante kennt, kann man für jede Menge m desselben das Volumen berechnen, das sie bei einer gegebenen Temperatur und bei einem gewissen Druck einnimmt. Wird

v in Litern und p in Grammgewichten pro cm² ausgedrückt, so ist die Gasconstante für Wasserstoff . . . 423
Stickstoff . . . 30
Sauerstoff . . . 27
Luft . . . 29

Wenn wir eine Gasmenge erwärmen, ohne ihr Gelegenheit zu geben sich auszudehnen, wenn also in der Gleichung $p_0 v_0 = \frac{p_1 v_1}{1 + a t_1}$ der Wert $v_0 = v_1$, so erhalten wir $p_1 = p_0 (1 + a t_1)$.

Wir können also den Ausdehnungscoefficienten auch dadurch bestimmen, dass wir die mit einer Temperaturzunahme verbundene Drucksteigerung messen.

Zu diesem Zwecke kann man sich des Luftthermometers bedienen (Fig. 134). Die hohle Glaskugel T ist durch ein Capillarrohr mit der weiteren Röhre B und diese durch einen mit Quecksilber gefüllten Schlauch S mit der verschiebbaren Röhre A verbunden. Nachdem man nun die Glaskugel T mit Eis oder Schnee umgeben und bis auf 0° C abgekühlt hat, verschiebt man die Röhre A so lange, bis das Quecksilber in B die Marke M berührt. Dann ist beim gleichzeitig abgelesenen Barometerstande b in der Kugel der Druck $p_0 = b + h_0$ vorhanden, falls das Quecksilber in A um h_0 höher steht als in B. Tauchen wir dann die Kugel T in ein Gefäß mit Wasser von der Temperatur t^0 C, so sinkt das Quecksilber in B und wir müssen die Röhre A nach oben verschieben, wenn das Quecksilber in B abermals die Marke M berühren soll. In der Glaskugel T herrsche dann der Druck $p_1 = b + h_1$.

Dann ist also $a = \frac{p_1 - p_0}{p_0 t} = \frac{h_1 - h_0}{(b + h_0) t}$

Bei genaueren Bestimmungen müsste man allerdings die mit der Erwärmung verbundene Ausdehnung der Glaskugel in Rechnung ziehen; diese fällt hier aber um so weniger in's Gewicht, weil sich die Gase etwa 150 mal stärker ausdehnen, als das Glas.

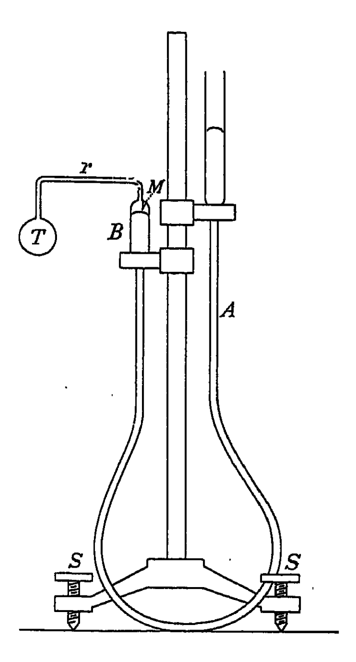


Fig. 134.

Nach derselben Methode kann man nun auch die Temperatur der in T enthaltenen Luft, beziehungsweise ihrer Umgebung messen, indem man zuerst den Druck p_0 für den Gefrierpunkt, dann den für den Siedepunkt p_{100} und endlich jenen Druck p_t bestimmt, wie er bei der zu messenden Temperatur t in T herrscht. Dann ist

$$t = \frac{p_t - p_0}{p_0 a} \text{ und } 100 = \frac{p_{100} - p_0}{p_0 a}$$

also $t : 100 = (p_t - p_0) : (p_{100} - p_0) = (h_t - h_0) : (h_{100} - h_0)$, weil $p_t - p_0 = (b + h_t) - (b + h_0) = h_t - h_0$ und $p_{100} - p_0 = h_{100} - h_0$;

daher ist $t = \frac{h_t - h_0}{h_{100} - h_0} \cdot 100$

Die so gemessenen Temperaturen stimmen mit den Angaben eines guten Quecksilberthermometers innerhalb des Gefrier- und Siedepunktes sehr gut überein, weichen aber von demselben für 200°—300° um 2°—5° ab. Da jedoch die Ausdehnung der Luft eine viel gleichmäßigere ist als die des Quecksilbers, so haben die Angaben eines Luftthermometers mehr Anspruch darauf als richtig zu gelten, und in diesem Sinne bezeichnet man daher das Luftthermometer auch als Normalthermometer.

Calorimetrie und specifische Wärme.

Wärmeeinheit. Wenn wir zwei Mengen Wasser von verschiedener Temperatur miteinander mischen, so können wir die Temperatur der Mischung nach den Regeln der Gesellschaftsrechnung vorausbestimmen. Haben also m_1 Gramm Wasser die Temperatur t_1 und m_2 Gramm die Temperatur t_2, so erhalten wir die Temperatur der Mischung nach der Formel $t = \frac{m_1 t_1 + m_2 t_2}{m_1 + m_2}$.

Die Anwendbarkeit dieser Formel setzt aber voraus, dass das Product aus der Masse des Wassers und seiner Temperatur nach der Mischung gleich groß sei, wie die Summe dieser Producte in beiden Bestandtheilen. Wir nehmen also an, dass 2 Liter Wasser, die sich um 1^0 C erwärmen, doppelt so viel Wärme aufnehmen als 1 Liter allein, und ein Liter, der um 3^0 C erwärmt wird, nimmt 3 mal so viel Wärme auf, als wenn er nur um 1^0 C erwärmt wird.

Steigt also die Temperatur von m kg Wasser um t^0 C, so enthalten sie $m t$ Calorien Wärme mehr als früher, wenn wir unter einer Calorie diejenige Wärmemenge verstehen, welche 1 kg Wasser um 1^0 C zu erwärmen vermag.

Um das absolute Maßsystem auch auf diese neue Einheit auszudehnen, bezeichnet man diejenige Wärmemenge, welche zur Erwärmung eines Grammes Wasser um 1^0 C hinreicht, ebenfalls als eine Calorie, aber zum Unterschiede von der zuerst angeführten als eine kleine Calorie.

Specifische Wärme der festen und flüssigen Körper. Wenn wir statt zwei Wassermengen von verschiedener Temperatur zu mischen, m_1 Gramm Quecksilber von der Temperatur t_1 mit m_2 Gramm Wasser von der Temperatur t_2 mischen, so nimmt die Mischung, nachdem sich die Temperatur ausgeglichen hat, nicht mehr jene Temperatur an, die sich aus der früher angewandten Formel ergeben würde. Mischen wir z. B. 1 kg Quecksilber von 40^0 C mit 1^0 kg Wasser von 10^0 C, so ist die Mischungstemperatur nicht $\frac{1000.40 + 1000.10}{1000 + 1000} = 25^0$ C, sondern nur etwa 11^0 C.

Das Wasser hat also nur eine Calorie aufgenommen und daher auch das Quecksilber nur eine abgegeben, obwohl seine Temperatur um etwa $40^0 - 11^0 = 29^0$ C gesunken ist. Da also eine Calorie ein Kilogramm Quecksilber um 29^0 C zu erwärmen vermöchte, so reichen $1:29 = 0{\cdot}034$ Calorien hin, um 1 kg Quecksilber um einen Grad C zu erwärmen. Diese Wärmemenge bezeichnen wir nun als die specifische Wärme des Quecksilbers und verstehen allgemein unter der specifischen Wärme eines Körpers die in Calorien ausgedrückte Wärmemenge, welche nöthig ist, um 1 kg desselben um 1^0 C zu erwärmen. Bei der Anwendung kleiner Calorien wird die Erwärmung auf die Masse eines Grammes bezogen. Wenn wir auch bei Gasen die specifische Wärme auf die Masseneinheit beziehen, so kommt die größte specifische Wärme dem Wasserstoffgas zu, sie beträgt nämlich 2·43. Davon abgesehen hat das Wasser die größte specifische Wärme. Wir haben sie durch die Aufstellung der Calorie als Einheit der Wärmemenge gleich 1 gesetzt.

Sie ist ferner für

Eis ... 0·5	Kalkspath .. 0·21	Kupfer .. 0·093	Messing .. 0·094	Alkohol ..... 0·6
Eisen . 0·11	Glas .... 0·15	Gold .... 0·03	Zink .... 0·098	Schwefelsäure 0·33

Zur Bestimmung der specifischen Wärme bedient man sich entweder der Mischungsmethode oder der Eisschmelzmethode. Die erstere haben wir bereits angewendet, um den Begriff der specifischen Wärme zu entwickeln und die specifische Wärme des Quecksilbers zu ermitteln.

Sind also M_1, t_1 und c_1 Masse, Temperatu
suchenden Körpers und M_2 und t_2 Masse und Tei
den Körper hineingeben, bis sich eine gemeinsa
nimmt offenbar das Wasser ebensoviel Calorien au.,
war, an dasselbe abgibt.

Es ist also $M_1 c_1 (t_1 - t) = M_2 (t - t_2)$ und daher $c_1 =$

Statt die Temperatur des in das Wasser versenkten Körpers m
meters festzustellen, kann man den Körper auch in siedendem W
durch er eben die Temperatur von 100° C annimmt.

Bei der Eisschmelzmethode verfährt man folgendermaß
bis zur Temperatur t, z. B. bis 100° C erwähnten Körper in die Ve
blockes und wartet, bis der Körper die Temperatur des Eises angenc
geht eine bestimmte Menge Eis in Wasser über, und dieses misst i
indem man es durch einen vorher tarierten Schwamm aufsaugen
Verflüssigung eines Kilogrammes Eis 80 Calorien nöthig sind, so w
der Masse m_1 und der specifischen Wärme c_1 bei einer Temperatur v... t_1 ... n
Calorien an das Eis abgeben und daher $r = n : 80$ kg Eis auflösen. Es ..
$n = 80\,r = m_1 c_1 t_1$ und $c_1 = \frac{80\,r}{m_1 t_1}$. Statt die Menge des geschmolzenen Eises ...
bestimmen, kann man nach Bunsen auch die Volumverminderung messen, welche Wasser und Eis zusammengenommen durch den so abgekühlten Körper erleiden.

Wenn wir uns bei der Bestimmung der Mischungstemperatur t statt des Wassers einer Flüssigkeit bedienen, welche die specifische Wärme c_1 besitzt, und es ist m_1 ihre Masse und t_1 ihre Temperatur, während m_2, c_2 und t_2 Masse, specifische Wärme und Temperatur eines Körpers oder einer zweiten Flüssigkeit sind, so muss wieder bei der Mischung die von einem Theile aufgenommene Wärme der von anderen abgegebenen gleich sein und daher $m_1 c_1 (t - t_1) = m_2 c_2 (t_2 - t)$ also $t = \frac{(m_1 c_1)\, t_1 + (m_2 c_2)\, t_2}{(m_1 c_1) + (m_2 c_2)}$

Um also in einem solchen Falle die Mischungstemperatur zu finden, können wir wieder wie eingangs die Formel der Gesellschaftsrechnung anwenden, nur treten jetzt in derselben nicht mehr die Massen allein, sondern die mit der specifischen Wärme multiplicierten Massen auf.

In diesem Producte $m_1 c_1$ bedeutet also c_1 die Anzahl Calorien, die zur Erwärmung von c_1 kg Wasser um 1° C nöthig sind, mithin $m_1 c_1$ die Zahl der Calorien für eine m_1 mal größere Menge bei der gleichen Temperatursteigerung. Wenn nun zur Erwärmung eines Apparates um 1° C w Calorien verwendet werden müssen, so bezeichnet man diese Maßzahl als den Wasserwert des Apparates und $m_1 c_1$ ist also in der obigen Formel nichts anderes, als der Wasserwert des einen Mischungsbestandtheiles und $m_2 c_2$ der des anderen. Wir haben also zur Bestimmung der Mischungstemperatur in der ersten Formel statt der Massen die Wasserwerte eingeführt.

Jeder Apparat, der dazu dient, die von einem Körper abgegebene Wärme in Calorien zu messen, wird Calorimeter genannt. Bei der Messung der bei einem physikalischen oder chemischen Processe abgegebenen Calorien müssen stets nebst der Temperaturerhöhung des Wassers auch der Wasserwert des Calorimeters und die Verluste an Wärme durch Leitung und Strahlung in Rechnung gestellt werden.

Die specifische Wärme der Gase. Da nach dem Mariotte-Gay-Lussac'schen Gesetze der Ausdruck $\frac{p\,v\,.\,273}{T}$ für eine bestimmte Gasmenge immer denselben Wert beibehält, so kann eine Steigerung der Temperatur T entweder mit einer Vergrößerung des Druckes p oder des Volumens v oder beider Größen verbunden sein. Wir bezeichnen nun die Wärmemenge, die zur Erwärmung von 1 kg um 1° C nöthig ist, wenn nur das Volumen sich ändert, während der Druck constant bleibt, als die specifische Wärme bei constantem Drucke mit c_p und, wenn nur der Druck sich ändert und das Volumen gleich bleibt, als specifische Wärme bei constantem Volumen mit c_v.

Den Wert von c_p hat der um die Wärmelehre hochverdiente französische Physiker Henri Victor Regnault zuerst für Luft und dann auch für

andere Gase folgendermaßen bestimmt. Er leitete die Luft mittels eines Schlangenrohres durch ein heißes Ölbad und von hier aus in ein Calorimeter. Aus der Temperaturabnahme der Luft im Calorimeter und der Temperatursteigerung des letzteren berechnete er die fortwährend unter dem Druck einer Atmosphäre jedem kg abgenommene Wärmemenge.

Auf diesem Wege erhielt er für Luft $c_p = 0{\cdot}237$;

bei Wasserstoff	3·41	Stickstoff	0·244
Sauerstoff	0·217	Kohlensäure	0·331.

Eine directe Bestimmung der specifischen Wärme bei constantem Volumen scheitert an der Schwierigkeit, dass die auch in größeren Gefäßen enthaltenen Gasmengen eine viel zu geringe Masse besitzen, als dass deren Wärme zu einer gut messbaren Temperatursteigerung der umgebenden Wassermenge hinreichen würde. Man berechnet daher c_v aus c_p, nachdem man das Verhältnis $k = \frac{c_p}{c_v}$ auf einem anderen Wege bestimmt hat.

Um den wechselseitigen Zusammenhang der Druck-, Volumen- und Temperaturänderungen besser verfolgen zu können, wollen wir uns der graphischen Darstellung (Fig. 135) bedienen; wir denken uns eine bestimmte Gasmenge in einer Röhre R eingeschlossen und gegen die äußere Luft durch einen reibungslos verschiebbaren Stempel S abgesperrt. Dann ist die Strecke l dem Volumen proportional und den im Gas herrschenden Druck stellen wir durch die Strecke p dar. Die Fläche des Rechteckes $F = p \,.\, l$ entspricht dann dem Producte $p\,v$. Construieren wir nun alle Rechtecke gleichen Inhaltes, welche dieselbe Ecke O und die beiden anstoßenden Seiten gemeinsam haben, so liegen alle O gegenüber liegenden Eckpunkte A auf einer Linie TT, welche, geometrisch genommen, eine gleichseitige Hyperbel ist — OX und OY sind ihre Assymptoten — wir bezeichnen sie hier aber als eine **isothermische Curve** oder einfach als eine **Isotherme**, weil sie die Beziehung zwischen Druck und Volum bei der Temperatur T angibt. Sie stellt also zugleich die Druck- und Volumveränderungen dar, wie sie dem Mariotte'schen Gesetze entsprechen.

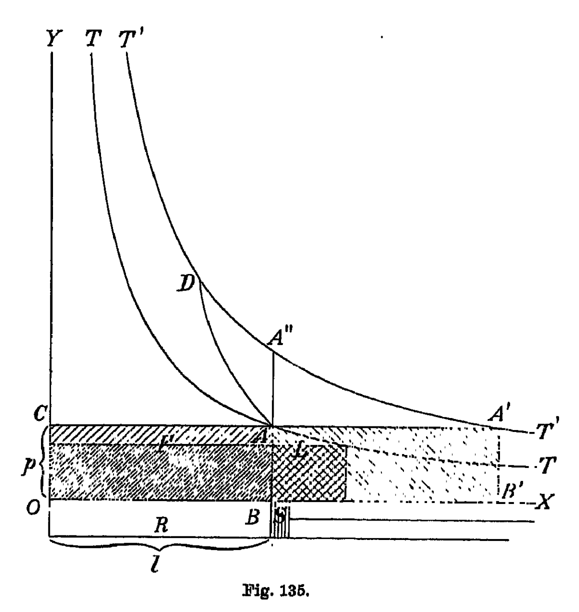


Fig. 135.

Wenn wir die Gasmenge in der Weise erwärmen, dass sie sich ohne Drucksteigerung ausdehnt, so ändert sich zwar nicht die Höhe p des obigen Rechteckes, wohl aber nimmt die dem Volumen proportionale Grundlinie zu bis $OB' = l'$, und der Punkt A beschreibt eine zur Grundlinie parallele Gerade AA', während die Temperatur zugleich von T bis T' steigt. Die Fläche L, um die sich das Rechteck dabei vergrößert, ist dann ein Maß der bei der Ausdehnung des Gases geleisteten Arbeit $L = p\,(l'-l)$, da der Druck p längs der Strecke $BB' = l'-l$ überwunden wurde. Die Linie AA' ist also ein Bild der dem Gay-Lussac'schen Gesetze folgenden Ausdehnung des Gases bei zunehmender Temperatur.

Führen wir dem Gase Wärme zu, ohne dass es sich ausdehnen kann, so steigt der Druck p, und der Punkt A beschreibt einen Weg AA'' parallel zu OY.

Wie nun das bei constantem Druck erwärmte Gas nicht nur eine Temperatursteigerung erfährt, sondern infolge der zunehmenden Ausdehnung auch noch Arbeit leistet, so ist auch mit jeder raschen Volumsverminderung nicht nur eine entsprechende Arbeitsleistung, sondern außerdem noch eine Erwärmung des Gases verbunden. Ein Stück Zündschwamm oder einige Tropfen Schwefeläther, die man in ein pneumatisches Feuerzeug gibt, können durch einen kräftigen Stoß auf den Stempel zur Entzündung gebracht werden. Da die Wärme, die bei einer sehr raschen Verdichtung erzeugt wird, in so kurzer Zeit nicht entweichen kann, so bezeichnet man einen solchen Vorgang als „adiabatisch". In diesem Falle muss bei der Compression ein um so größerer Druck überwunden werden, je mehr das Gas durch die Verdichtung bereits erwärmt worden ist. Die Linie, welche die betreffenden Druck- und Volumänderungen darstellt, nennt man dann eine adiabatische Curve (AD).

Durch Vergleichung der Druckunterschiede bei adiabatischen und isothermischen Vorgängen gelangen wir nun zur Bestimmung des Verhältnisses $k = \frac{c_p}{c_v}$ nach der Methode von Clement und Desormes. In einem größeren Glasballon A (Fig. 136), der durch einen Hahn geöffnet werden kann, wird die Luft durch eine Saugwirkung an der Öffnung L etwas verdünnt und die Verdünnung am Manometer M abgelesen. Bis zur Dichte der äußeren Luft zusammengedrückt, würde die Luft im Ballon nicht mehr den ganzen Raum ausfüllen. Wie sich nun die Ausdehnung eines erwärmten Gases durch die damit verbundene Druckveränderung messen lässt, so können wir hier den Manometerstand h als Maß einer solchen Erwärmung der eingeschlossenen Luft betrachten, dass sie das ganze Volumen ausfüllen würde. Wenn wir nun den Hahn nur auf eine halbe Secunde öffnen, so verschwindet momentan die Niveaudifferenz h, es stellt sich aber bald wieder eine neue Differenz h' ein.

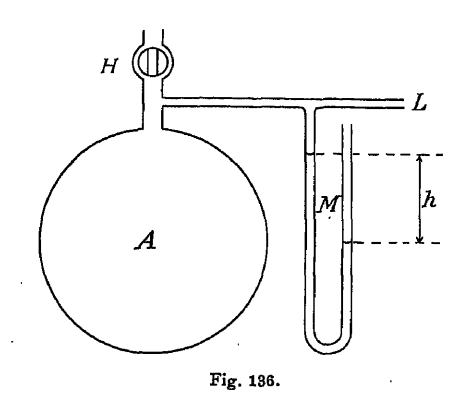


Fig. 136.

Das vorübergehende Verschwinden jedes Druckunterschiedes kam aber nicht daher, dass sofort soviel Luft eindrang, als bei der Verdünnung herausgenommen worden war; durch die plötzliche Verdichtung wurde nämlich die eingeschlossene Luft erwärmt, und daher stieg ihr Druck derart, dass die erwärmte Luft der äußeren Luft schon früher das Gleichgewicht hielt. Nachdem dann die dabei erzeugte Wärme durch die Glaswände entwichen ist, stellt sich also ein Manometerstand h' ein, als Maß für die bloße Verdichtungsarbeit ohne Erwärmung.

Auf die zur bloßen Temperatursteigerung verwendete Wärme entfällt also nur mehr die Druckdifferenz $h - h'$. Das Verhältnis $\frac{h}{h-h'}$ stellt daher das Verhältnis beider Wärmemengen dar, deren eine bei derselben Gasmenge sowohl Ausdehnung als auch Temperatursteigerung hervorgebracht hätte, während letztere nur eine Erhöhung der Temperatur bewirkt hat.

Daher ist auch $h : (h - h') = c_p / c_v = k$

Aus sehr sorgfältig angestellten Versuchen, wie sie speciell der bekannte deutsche Physiker Röntgen ausgeführt hat, ergab sich für Luft $k = 1·41$. Fast genau denselben Wert erhält man auch bei Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff. Dagegen ist für Kohlensäure $k = 1·29$ und für Quecksilberdampf $k = 1·667$.

Infolge dessen ergibt sich für die specifische Wärme bei constantem Volumen c_v

bei Wasserstoff 2·43	Luft . . . 0·169	Kohlensäure . . . 0·148
Stickstoff . 0·173	Sauerstoff 0·155	Chlor . . . . 0·087

Zur Berechnung der Druckerhöhung bei einer adiabatischen Verdichtung gehen wir von der schon zur Bestimmung des Ausdehnungscoefficienten benützten Formel aus $\frac{P_1 - P_0}{P_0} = a\,t$, derzufolge $P_1 - P_0 = P_0 a t$. Würden wir zur Herstellung des steigenden Druckes $P_0, P_1, \dots P_n$ n mal hintereinander die Wärmemenge Q verwenden, so wäre bei constantem Volumen die Temperatursteigerung $t = Q/c_v$ und $P_1 = P_0\left(1 + \frac{aQ}{c_v}\right)$; wenn wir dann ein zweitesmal die Wärmemenge Q zuführen, so wird $P_2 = P_1\left(1 + \frac{aQ}{c_v}\right) = P_0\left(1 + \frac{aQ}{c_v}\right)^2$; nach n maliger Zuführung der Wärme $Q = W/n$, also mit einem Wärmeaufwande von W Calorien erhalten wir demnach einen Druck

$$P_n = P_0\left(1 + \frac{aQ}{c_v}\right)^n = P_0\left(1 + \frac{aW}{n\,c_v}\right)^n = P_0\, e^{\frac{aW}{c_v}},$$

wenn wir den bei der Ableitung der Formel für barometrische Höhenmessung angeführten mathematischen Lehrsatz benützen.

Den Werten des zunehmenden Druckes $P_0, P_1, \dots P_n$ entsprechen die abnehmenden Volumina $V_0, V_1, \dots V_n$.

Soll nun dieselbe Wärmemenge W diese Volumveränderungen bei constantem Druck herbeiführen, so bewirkt die Wärmemenge $Q = W/n$ die Temperatursteigerung $t = Q/c_p$, weshalb $V_0 = V_1\left(1 + \frac{aQ}{c_p}\right)$, $V_1 = V_2\left(1 + \frac{aQ}{c_p}\right)$ und daher

$$V_0 = V_2\left(1 + \frac{aQ}{c_p}\right)^2 \text{ u. s. w.}$$ Bei n maliger Zuführung der Wärmemenge Q ist $V_0 = V_n\left(1 + \frac{aQ}{c_p}\right)^n = V_n\left(1 + \frac{aW}{n\,c_p}\right)^n$ und daher

$$V = V_n\, e^{\frac{aW}{c_p}} = V_n\, e^{\frac{aW}{k\,.\,c_v}} = V_n\left(e^{\frac{aW}{c_v}}\right)^{\frac{1}{k}}; \text{ also ist auch } \left(\frac{V_0}{V_n}\right)^k = e^{\frac{aW}{c_v}}$$

Da wir früher gefunden haben, dass also $\frac{P_n}{P_0} = e^{\frac{aW}{c_v}}$, so besteht nun die Gleichung $\frac{P_n}{P_0} = \left(\frac{V_0}{V_n}\right)^k$. Wenn wir also ein Gas adiabatisch verdichten, dass das Volumen von V_0 bis auf V_n vermindert wird, so bewirkt diese mit Erwärmung verbundene Arbeit eine solche Drucksteigerung, dass $P_n = P_0\left(\frac{V_0}{V_n}\right)^k$; Gesetz von Poisson.

Dieser Gleichung zwischen p und v entspricht nun die Curve AD (Fig. 135), welche wir als „Adiabate" bezeichneten, und diese Linie steigt, von irgend einem Zustande des Gases A ausgehend, viel steiler an als die vom gleichem Punkte ausgehende „Isotherme" AT.

Fast alle bei den praktischen Anwendungen vorkommenden Zustandsänderungen der Gase entsprechen der einen oder der anderen dieser Curven, der horizontalen AA', welche das Gay-Lussac'sche Gesetz darstellt, der darauf senkrechten AA'', welche der Erwärmung bei constantem Volumen entspricht oder der Isotherme TT, oder endlich der Adiabate AD. Die angeführten Formeln reichen auch hin, um diese Vorgänge auf dem Wege der Rechnung annähernd zu verfolgen, was besonders beim letzteren Falle wichtig ist. Wenn z. B. Luft von $0^0\,C$ im pneumatischen Feuerzeug auf $^1/_{10}$ ihres Volumens adiabatisch verdichtet wird, so können wir nun die Temperatur, welche diese Verdichtung erzeugt, folgendermaßen berechnen. Es ist also $V_0 = 10\,V_n$ und daher $P_n = P_0 \, . \, 10^{1\cdot41}$; $P_0\,V_0 = m\,R \, . \, 273$, $P_n\,V_n = P_0 \, . \, 10^{1\cdot41} \, . \, \frac{V_0}{10} = m\,R \, . \, T$; also $m\,R \, . \, 273 \, . \, 10^{0\cdot41} = m\,R \, . \, T$ und daher $T = 273 \, . \, 10^{0\cdot41} = 702$, also $T = 273 + t = 702$ und $t = 428$ ist die erzielte Temperaturerhöhung. Wenn ferner der ursprüngliche Druck P_0 eine Atmosphäre war, so steigt der Druck bis $P_n = P_0 \, . \, 10^{1\cdot41} = 25.7$ Atmosphären, während er ohne Erwärmung nur auf 10 Atmosphären gestiegen wäre.

Das mechanische Wärmeäquivalent.

Der fast mit jeder Verdichtung oder Verdünnung eines Gases verbundene Austausch von Wärme und Arbeit bot den Schlüssel zu einer der fundamentalsten Erkenntnisse für die ganze Physik, nämlich zum Satze von der Erhaltung der Energie. Schon im Jahre 1824 hatte der Ingenieur-Capitain Nicolas-Leonard-Sadi Carnot sein berühmtes Werk „Über die bewegende Kraft des Feuers und die zu ihrer Ausnützung dienenden Maschinen" geschrieben und hervorgehoben, dass durch den Übergang der Wärme von einem wärmeren zu einem kälteren Körper Arbeit gewonnen werden könne. Die Entfernungen der Punkte A von den Geraden OX und OY in Fig. 137 sollen Druck und Volumen einer Gasmenge angeben, die wir 1) durch Wärmezufuhr einer isothermen Ausdehnung, 2) einer adiabatischen Verdünnung, 3) durch Wärmeentziehung einer isothermischen und endlich 4) wieder einer adiabatischen Verdichtung unterziehen. Diese vier Vorgänge, welche durch die vier Linien $A_1\,A_2$, $A_2\,A_3$, $A_3\,A_4$ und $A_4\,A_1$ dargestellt werden, führen schließlich

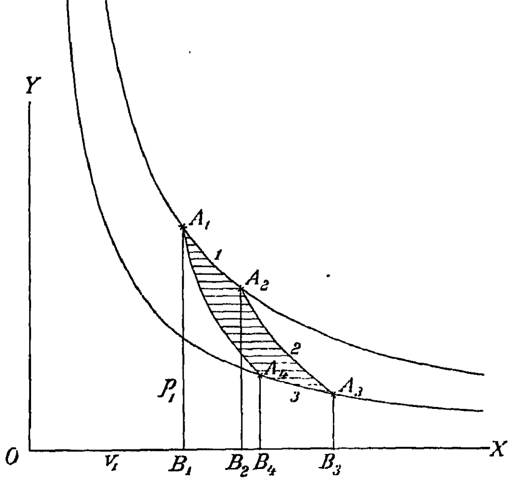


Fig. 137.

genau zu denselben Druck- und Volumverhältnissen, wie sie vor Beginn der Veränderungen vorhanden waren, und bilden den sogenannten Carnotschen Kreisprocess. Dabei ist aber die im ersten Stadium aufgenommene Wärme größer als die im dritten Stadium abgegebene, und die mit diesen vier Vorgängen verbundenen Arbeitsleistungen entsprechen beziehungsweise den Flächen $A_1\,A_2\,B_2\,B_1$, $A_2\,A_3\,B_3\,B_2$, $A_3\,A_4\,B_4\,B_3$ und $A_4\,A_1\,B_1\,B_4$. Die

beiden ersteren stellen positive, die letzteren negative Arbeitsleistungen dar, wenn wir die Arbeit des Gases als positiv auffassen, falls es sich ausdehnt, und als negativ, wenn es sich zusammenzieht. Die Differenz dieser Arbeitssummen entspricht dann der Fläche $A_1 A_2 A_3 A_4$.

Obwohl also der Zustand des Gases nach Ablauf des Kreisprocesses genau derselbe ist wie vor Beginn, so ist doch die vom Gase aufgenommene Wärme größer als die abgegebene und die positive Arbeit des Gases größer als die negative. Der entscheidende Schritt in der Auffassung dieses Vorganges liegt nun darin, dass wir ihn als die Umsetzung der Wärme in mechanische Arbeit hinstellen. Es ist das unsterbliche Verdienst des Heilbronner Arztes Julius Robert Mayer, dass er nicht nur das Wesen und die Bedeutung dieses Umsatzes zuerst erkannte, sondern auch angab, wie viel Arbeitseinheiten einer Wärmeeinheit entsprechen. Er selbst erzählt, dass ihm diese Erkenntnis bereits im Jahre 1840 auf seiner Seereise nach Java klar geworden sei. Der Unterschied zwischen der specifischen Wärme der Gase bei constantem Druck und constantem Volumen enthielt für ihn nicht nur den Beweis für die Verwandlung, sondern auch die einzigen Angaben zur Berechnung des mechanischen Äquivalentes, und das Resultat dieser seiner Entdeckung veröffentlichte er im Maihefte des Jahrganges 1842 in Liebig's „Annalen der Chemie und Pharmacie" unter dem Titel „Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur". Schon im folgenden Jahre legte Colding der Akademie in Kopenhagen eine Abhandlung über die „Erhaltung der Energie" vor, und im August des Jahres 1843 verlas James Prescott Joule vor der Section für Mathematik und Physik der „British Association" zu Cork seine Arbeit „Über die erwärmenden Wirkungen der Magneto-Elektricität und über den mechanischen Wert der Wärme". Im Jahre 1847 erschien dann die Schrift „Über die Erhaltung der Kraft", in der auch Prof. Hermann Helmholtz dieses Princip vertrat, das er später noch ausführlicher behandelte und wissenschaftlich formulierte. Der heftige Prioritätsstreit, der sich nun entspann, und die beleidigende Verkennung, der dabei Robert Mayer ausgesetzt war, brachten diesen an den Rand des Grabes. Erst in den 60ger Jahren, als dieses Princip endlich Gemeingut aller Physiker geworden war, wurden auch dem tiefsinnigen Entdecker die wohlverdienten Ehren zutheil. Der Gedankengang, den er bei der Auffindung des mechanischen Wärmeäquivalentes einschlug, ist ungefähr folgender. Ein Cubikmeter Luft wiegt bei 0^0 C und 76 cm Barometerstand 1·293 kg. Um das Volumen desselben auf 2 m^3 auszudehnen, indem eine Begrenzungsfläche von 1 m^2 um 1 m parallel zu sich selbst verschoben wird, sind 273 . 0·237 . 1·293 = 84 Calorien nöthig, denn um 1 kg um 1^0 C zu erwärmen, sind 0·237 Calorien, um 1·293 kg um 1^0 C zu erwärmen, 0·237 . 1·293 und um die Luft bis zum doppelten Volumen auszudehnen, ist endlich eine Temperatursteigerung von 273^0 C erforderlich. Soll diese Luftmenge bei constantem Volumen ebenso sehr erwärmt werden, so sind 273 . 0·169 . 1·293 = 59·5 Calorien, also 24·5 Calorien weniger nöthig. Dagegen wird im ersten Fall bei der Ausdehnung ein Druck von 100^2. 1·033 kg längs eines Meters überwunden, also eine Arbeit von 10330 kgm geleistet. Mithin entfällt auf 1 Calorie eine Arbeit von 10330 : 24·5 = 422 kgm.

Bald, nachdem J. R. Mayer diesen Wert aus der specifischen Wärme der Gase berechnet hatte, gelangte Joule durch seine ebenso geschickt entworfenen,

als sorgfältig durchgeführten Versuche ungefähr zum gleichen Resultate. Durch das Herabsinken des Gewichtes P (Fig. 138) wurde die an der Achse AB befestigte Scheibe S in Drehung versetzt, deren Rand die Mantelfläche eines Kegelstumpfes bildete. Gegen diese wurde durch den Hebel DH die Mantelfläche eines Hohlkegels K gedrückt, sodass die bei der Reibung geleistete Arbeit in Wärme umgesetzt wurde. Die sich reibenden Scheiben befanden sich in einem Gefäße mit Quecksilber G, das als Calorimeter diente. Die Arbeit $h . P$ wurde dann der Anzahl Calorien gleichgesetzt, die das Calorimeter bei der Reibung zwischen S und K aufgenommen hatte.

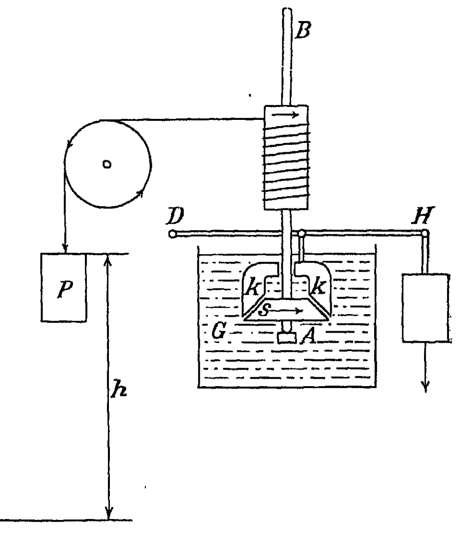


Fig. 138.

Ingenieur Hirn ermittelte das mechanische Wärmeäquivalent, indem er die lebendige Kraft eines herabfallenden Eisenblockes benützte, um ein Bleistück durch den Stoß zu erwärmen; die so erzeugte Wärme wurde wieder calorimetrisch gemessen und die mechanische Arbeit aus der Masse und Fallhöhe berechnet. Aus den zuverlässigsten Versuchen ergibt sich für das mechanische Äquivalent einer Calorie eine Arbeit von 425 Kilogrammetern.

Veränderungen des Aggregatzustandes durch die Wärme.

Der Schmelzpunkt. Wenn man einem festen Körper Wärme zuführt, so steigt seine Temperatur, und zwar jedesmal um 1° C, so oft wir ihm eine seiner specifischen Wärme entsprechende Anzahl von Calorien zuführen. Von einem bestimmten Punkte angefangen erhöht sich aber seine Temperatur trotz der noch zugeführten Wärme nicht mehr, falls er bei derselben in den flüssigen Aggregatzustand übergeht. Wenn man $^1/_4$ kg Eis von 0°C in 1 l Wasser von 40° C gibt, so sinkt die Temperatur der Mischung auf 16° C, auch wenn keine Wärme durch Leitung verloren geht. Das Wasser hat also $40 - 16 = 24$ Calorien abgegeben, um $^1/_4$ kg Eis in Wasser von 16° C zu verwandeln. Da zur Erwärmung des Wassers von 0° C bis 16° C nur 4 Calorien nöthig sind, so waren also 20 Calorien nothwendig zur Verwandlung von $^1/_4$ kg Eis in Wasser. Zur Verwandlung von 1 kg Eis von 0° C in Wasser von 0° C sind mithin 80 Calorien erforderlich.

Die Temperatur, bei der ein Körper vom festen in den flüssigen Zustand übergeht, bezeichnet man als seinen **Schmelzpunkt**, und die Anzahl Calorien, welche zur Verflüssigung eines Kilogrammes nöthig sind, als seine **Schmelzwärme**.

Wenn umgekehrt einem flüssigen Körper immer mehr Wärme entzogen wird, so sinkt zuerst seine Temperatur immer tiefer, und bei einer bestimmten Temperatur beginnt er zu erstarren; dann sinkt seine Temperatur nicht mehr tiefer, bis der ganze Körper in den festen Zustand übergegangen ist.

Diese Temperatur, der Erstarrungspunkt, ist nun dieselbe wie beim Schmelzpunkt, und die Wärme, welche dabei „frei" wird, ist ebensogroß wie die Schmelzwärme, die bei der Verflüssigung „latent" oder „gebunden" worden ist.

Schmelzpunkt und Schmelzwärme gehören zu den wichtigsten Angaben, um das physikalische Verhalten eines Körpers zu charakterisieren. Ihre Werte sind für:

	Schmelzpunkt	Schmelzwärme		Schmelzpunkt	Schmelzwärme
Platin	1760 °C	27·2 Cal.	Zinn	228 °C	13·3 Cal.
Eisen	1500 „	30 „	Schwefel	115 „	9·4 „
Silber	970 „	21 „	Glycerin	20 „	42 „
Zink	412 „	28·1 „	Essigsäure	16·5 „	45 „
Blei	327 „	5·8 „	Wasser	0 „	80 „
Kadmium	321 „	13·7 „	Quecksilber	—40 „	2·8 „
Wismut	267 „	12·6 „			

Der Schmelzpunkt einer Legierung liegt oft nicht nur unter dem Mittelwerte der Schmelzpunkte sämmtlicher Bestandtheile, sondern sogar noch tiefer als der Schmelzpunkt jedes einzelnen Bestandtheiles. So geben z. B. 2 Gewichtstheile Wismut, 1 Th. Blei und 1 Th. Zinn das sogenannte Rose'sche Metall, das bei 93·7° C flüssig wird, und das Wood'sche Metall, welches bei 60·5° C schmilzt, besteht aus 4 Th. Wismut, 2 Th. Blei, 1 Th. Zinn und 1 Th. Kadmium. Beide Legierungen lassen sich also in siedendem Wasser schmelzen und werden dann flüssig wie Quecksilber.

Die Höhe des Schmelzpunktes hängt aber nicht allein von der chemischen Beschaffenheit des Körpers ab, sondern sie wird auch durch den Druck beeinflusst, unter dem sich der Körper befindet. Dieser Umstand ist besonders für das Verhalten des Eises von großer Wichtigkeit. Bei einer Zunahme des Druckes um 1 Atm. sinkt sein Schmelzpunkt um 0·0075° C, und daher wird das Eis bei einem Drucke von 1000 Atm., also von etwa ebenso vielen kg pro cm², schon bei — 7·5° C flüssig. Sobald es aber diese Druckstelle verlassen hat, wird es sofort wieder fest und gibt dann dem Eisstücke eine andere Gestalt. Diese Erscheinung bezeichnet man als die Regelation des Eises. Hängt man mittels einer Drahtschleife ein Gewicht von etwa 10 kg über einen Eisblock, so dringt der Draht auch bei einer Temperatur über 0° C immer tiefer in denselben ein und durchschneidet ihn schließlich, ohne dass er dabei in zwei Theile zerfällt.

Bei der Abkühlung einer Flüssigkeit unter dem Schmelzpunkte kommt es oft vor, dass die Erstarrung nicht eintritt, wenn die Flüssigkeit nicht durch stoßartige Bewegungen oder ein Theilchen der bereits erstarrten Flüssigkeit zur Änderung des Aggregatszustandes angeregt wird. Wenn man z. B. Natriumthiosulfat oder unterschwefligsaures Natrium in einem Porcellantigel über 45° C erwärmt und dann wieder abkühlen lässt, so erstarrt es bei dieser Temperatur noch nicht, wenn man nicht umrührt oder einen Krystall dieses Salzes hineinwirft; dann aber tritt die Erstarrung sehr rasch ein und ist mit einer deutlich bemerkbaren Selbsterwärmung des Salzes verbunden. Eine solche Flüssigkeit, die unter ihrem Erstarrungspunkt sich noch im flüssigen Zustande befindet, bezeichnet man als „unterkühlt". Diese Unterkühlung tritt auch beim Wasser auf, und dann reicht meistens schon eine leichte Erschütterung hin, um die Erstarrung herbeizuführen. Diese Erscheinung erinnert an die labile Gleichgewichtslage fester Körper. Die geringste Verschiebung der einzelnen Theilchen aus dieser Lage reicht hin, um alle übrigen in eine Bewegung hineinzuziehen, die zur stabilen Gleichgewichtslage führt.

Kältemischungen. Die Bindung von Wärme beim Übergang vom festen in den flüssigen Zustand erfolgt nicht nur, wenn wir einen Körper bis über seinen Schmelzpunkt erwärmen, sondern auch dann, wenn wir ihn durch Auflösung in einer Flüssigkeit in diesen Zustand überführen. In diesem Falle muss die lösende Flüssigkeit die zum Schmelzprocess nöthige Wärme hergeben, und daher wird dabei ihre Temperatur sinken. Diese Temperaturerniedrigung zeigt sich z. B., wenn man eine größere Menge

Salpeter, viel stärker aber, wenn man salpetersaures Ammoniak in einer gleich großen Gewichtsmenge Wasser rasch zur Lösung bringt; im letzteren Falle sinkt die Temperatur um etwa 27° C. Ist die Temperatur hinreichend nieder, so erreicht man auf diesem Wege leicht Temperaturen, die unter 0° C liegen. Fein zerstoßenes Eis gibt mit der halben Gewichtsmenge Kochsalz eine Kältemischung von etwa 20° C Kälte. Eine kleinere Menge Wasser, welche von einer solchen Kältemischung ganz umgeben ist, kann durch die Bindung der Wärme zum Gefrieren gebracht werden.

Andererseits tritt in einer Flüssigkeit eine Temperatursteigerung auf, wenn sich aus derselben ein gelöster Bestandtheil in fester Form ausscheidet. Bei höherer Temperatur löst sich das Glaubersalz im Wasser in viel größeren Mengen als bei einer tieferen Temperatur. Wenn man also eine gesättigte Glaubersalzlösung abkühlt, so scheidet sich das Glaubersalz in krystallinischer Form aus und die dabei freiwerdende Wärme bewirkt, dass die Lösung viel langsamer abkühlt, als dies ohne die Ausscheidung des Salzes des Fall wäre.

Der Siedepunkt. Die Temperatur eines in den flüssigen Zustand übergegangenen festen Körpers steigt bei weiterer Wärmezufuhr abermals, und zwar in Folge der Veränderung der specifischen Wärme in einem anderen Maße als beim festen Körper, bis neuerdings eine Änderung des Aggregatszustandes unter gleichzeitiger Bindung von Wärme eintritt. In ähnlicher Weise wie früher bezeichnet man nun

die Temperatur, bei welcher eine Flüssigkeit in den luftförmigen Zustand übergeht, als den **Siedepunkt** *und die Anzahl der Calorien, welche nöthig sind, um 1 kg vollständig in denselben überzuführen, als die* **Verdampfungswärme.**

Im viel höheren Grade, als es beim Schmelzpunkte der Fall war, ist der Siedepunkt vom herrschenden Drucke abhängig. Die folgenden Siedepunktangaben beziehen sich auf den Druck einer Atmosphäre.

	Siedepunkt	Verdampfungswärme		Siedepunkt	Verdampfungswärme
Aether	35 °C	88 Cal.	Wasser	100 °C	536 Cal.
Schwefelkohlenstoff	47 „	84 „	Essigsäure . . .	118 „	121 „
Alkohol	78·3 „	205 „	Jod	210 „	24 „

An der Oberfläche der Flüssigkeiten erfolgt der Übergang in den luftförmigen Zustand bereits bei tieferen Temperaturen und wird dann als „Verdunsten“ bezeichnet. Im Innern der Flüssigkeit tritt die Dampfbildung erst dann ein, wenn dieselbe ihrer ganzen Ausdehnung nach den Siedepunkt erreicht hat, und zwar in dem Maße, als die zugeführte Wärme zur Deckung der nöthigen Verdampfungswärme hinreicht. Zugleich beobachtet man, dass die Dampfblasen meist von einigen Stellen des Gefäßbodens ausgehen, wo sich kleine Unebenheiten befinden, während sich bei ganz glatter Oberfläche auch ein kleiner *Siedeverzug* einstellen kann.

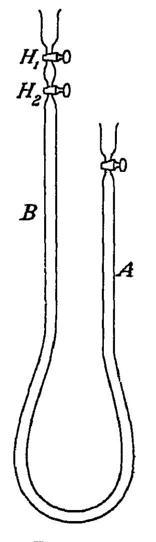


Fig. 139.

Dass das Wasser unter entsprechend geringem Druck schon bei gewöhnlicher Temperatur in Dampfform übergeht und dann wie alle Dämpfe einen gewissen Druck auszuüben vermag, davon kann man sich durch folgenden Versuch überzeugen. Wir benützen die mit zwei Hähnen H_1 und H_2 versehene Röhre B (Fig. 139), welche durch einen mit Quecksilber gefüllten Schlauch mit der Röhre A verbunden ist, und stellen unter dem Hahne H_2 einen kleinen luftleeren Raum her, während der Hahn H_1 offen bleibt. Wenn wir nun den Raum

zwischen den beiden Hähnen mit Wasser füllen und dann den Hahn H_1 schließen, den Hahn H_2 aber öffnen, so sinkt das Quecksilber in der Röhre B um etwa 1·3 cm. Einen solchen Druck könnte erst eine 18 cm hohe Wassersäule ausüben, also kann dieser Druck nur durch die im luftleeren Raume sich bildenden Wasserdämpfe hervorgerufen worden sein. Wenn wir diesen Versuch bei den verschiedensten Temperaturen vornehmen würden, so gelangen wir zur folgenden Tabelle, die auch noch für die Temperaturen unter 0° C und über 100° C ergänzt worden ist.

t	cm	t	cm	t	cm	t	Atm.
— 19	0·103	0	0·457	+ 20	1·74	115	1·67
— 18	0·112	+ 1	0·491	21	1·85	120	1·96
— 17	0·122	2	0·527	22	1·96	125	2·3
— 16	0·132	3	0·566	23	2·09	150	4·6
— 15	0·144	4	0·607	24	2·22	175	8·6
— 14	0·156	5	0·651	25	2·35	200	18·2
— 13	0·169	6	0·697	26	2·50		
— 12	0·184	7	0·747	27	2·65		
— 11	0·199	8	0·799	28	2·80		
— 10	0·215	9	9·855	29	2·97		
— 9	0·233	10	0·914	30	3·15		
— 8	0·251	11	0·977	40	5·49		
— 7	0·272	12	1·04	50	9·20		
— 6	0·293	13	1·11	60	14·8		
— 5	0·316	14	1·19	70	23·3		
— 4	0·341	15	1·27	80	35·5		
— 3	0·367	16	1·35	90	52·5 Atm.		
— 2	0·395	17	1·44	100	76·0 = 1·0		
— 1	0·425	18	1·53	105	90·6 = 1·2		
0	0·457	19	1·63	110	108·4 = 1·44		

Daraus ersehen wir zunächst, dass das Wasser nicht nur im flüssigen, sondern sogar im festen Zustande in die Dampfform übergeht und daher auch das Eis der Luft Feuchtigkeit mitzutheilen vermag. Ferner ergibt sich daraus, bei welcher Temperatur die Dampfspannung einen bestimmten Luftdruck zu überwinden vermag.

Mit Hilfe dieser Dampfspannungstabelle kann man auch den Luftdruck aus der Siedetemperatur ermitteln. Darauf beruht die barometrische Höhenmessung mit dem Hypsometer, einem Apparate, der nur dazu dient, den Siedepunkt meist bis auf Zehntel von Celsiusgraden festzustellen, um daraus den Barometerstand zu entnehmen und dann den Höhenunterschied zwischen zwei Orten zu berechnen.

Bei der Verwendung des Papin'schen Topfes verfolgt man den Zweck, mit dem Dampfdrucke auch den Siedepunkt zu erhöhen, weil z. B. das Fleisch bei einer höheren Temperatur viel schneller weich gekocht werden kann. Andererseits sucht man bei den Kesselanlagen, die zur Speisung von Dampfmaschinen dienen, zugleich mit dem erhöhten Siedepunkte einen desto höheren Dampfdruck zu erzielen. So herrscht z. B. bei einer Temperatur von 175° C in einem Dampfkessel immer ein Druck von 8·6 Atmosphären.

Gegen eine zu starke Steigerung des Druckes schützt man den Kessel durch „Sicherheitsventile“, welche aber den Dampf nur solange entweichen lassen, als der Druck ein gewisses Maß übersteigt und sich dann sofort von selbst schließen. Das Öffnen eines Ventils ohne einen derartigen Verschluss wäre sogar sehr gefährlich. Da nämlich durch das dauernde Öffnen der Druck im Kessel bis auf eine Atmosphäre sinken würde, so hätte dies zur Folge, dass z. B. bei einer Temperatur von 175° C je 100 *l* eine Wärmemenge von 75 × 100 Calorien abgeben, welche plötzlich 7500 : 536 = 14 kg, also etwa 17000 *l* Dampf zu erzeugen vermöchten.

Das Leidenfrost'sche Phänomen. Wenn man einen Tropfen Wasser in eine bis zur Rothglut erwärmte Platinschale gibt, so geräth er sofort in sehr heftige drehende Bewegung und verpufft erst, nachdem sich die Schale einigermaßen abgekühlt hat. Diese zuerst vom Duisburger Professor Leidenfrost im Jahre 1756 beschriebene Erscheinung ist für das Verhalten der Flüssigkeiten bei der Verdampfung sehr bezeichnend. So lange die metallene Unterlage einen hinreichenden Wärmevorrath besitzt, um das mit ihr in Berührung kommende Wasser sofort zu verdampfen, ist an keiner Stelle eine dauernde Berührung zwischen dem Wasser und dem heißen Metall möglich und der Wassertropfen erhält sich seiner Hauptmasse nach im flüssigen Zustande. Erst wenn die dem Wasser zugeführte Wärme dasselbe nicht mehr rasch genug zu verdampfen und daher eine directe Berührung nicht mehr aufzuhalten vermag, so wird der ganze Tropfen bis zum Sieden erhitzt und verpufft dann. Die bei kleineren Tropfen mehr kugelförmige, bei größeren rosettenartige Gestalt, welche die Wassermasse dabei annimmt, hat dazu Veranlassung gegeben, von einem sphäroidalen Zustande des Wassers zu reden. Auf denselben Grund ist auch die Erscheinung zurückzuführen, dass man aus einem Behälter mit sehr heißem, flüssigen Blei dieses mit der nackten Haud unbeschadet herausschöpfen kann, während bei der Berührung eines viel weniger heißen Metallstückes sofort die Haut zerstört wird.

Der Unterschied zwischen Dämpfen und Gasen. Als die charakteristische Eigenschaft der Gase haben wir in der Aëromechanik das Mariotte-Gay-Lussac'sche Gesetz kennen gelernt. Dieses Gesetz befolgen nun die unmittelbar aus einer Flüssigkeit sich entwickelnden Dämpfe noch nicht, denn, wenn wir sie zu comprimieren versuchen, so tritt nicht eine der Volumsverminderung entsprechende Druckerhöhung ein, sondern sie condensieren sich, und der Druck behält seinen Wert bei, solange die Temperatur dieselbe bleibt.

Die Vergrößerung des Volumens bewirkt dagegen auch keine Verminderung des Druckes, sondern sie steigert nur die Dampfbildung, solange noch eine Flüssigkeit vorräthig ist, bis der frühere Druck wieder eintritt. Dagegen hat eine Erhöhung der Temperatur bei constantem Volumen allerdings eine Steigerung des Druckes im Gefolge, aber nicht in demselben Maße, wie sie dem Ausdehnungscoefficienten der Gase entsprechen würde, sondern es stellt sich immer nur jener Druck ein, den wir in der Spannkraftstabelle bei dieser Temperatur angegeben finden. Dieses Verhalten ist bezeichnend für das Stadium der „gesättigten Dämpfe" und lässt sich durch folgende Versuche nachweisen, die wir mit dem Apparate Fig. 139 anstellen können. Lassen wir nämlich in den luftleeren Raum, welchen wir in der Röhre B über dem Quecksilber zuerst hergestellt haben, durch den Hahn H_2 Schwefeläther einströmen, während der Hahn H_1 geschlossen bleibt, so sinkt der Barometerstand sofort um etwa 44 cm, und die Niveaudifferenz bleibt in den beiden Röhren nahezu dieselbe, wenn wir auch durch Heben und Senken der Röhre A das Volumen der Ätherdämpfe bald vergrößern, bald verkleinern. Bei der Vergrößerung geht nämlich immer neuer Äther in Dampfform über, während bei der Volumsverminderung der Dampf wieder flüssig oder „condensiert" wird.

Wenn man in einem leeren Kochkolben eine Röhre befestiget, die unter Wasser mündet, so steigen in diesem sofort Luftblasen auf, wenn man den Kolben erwärmt. Wenn wir aber die Dämpfe, die in reicher Menge aus dem im Kolben siedenden Wasser aufsteigen, in kaltes Wasser leiten, so steigen keine Blasen mehr auf, weil in diesem Falle die Dämpfe durch die Temperaturerniederung „condensiert" wurden, während wir früher die Ätherdämpfe durch Druckerhöhung flüssig gemacht haben.

Dieses Verhalten der Dämpfe lässt sich nun auf graphischem Wege in folgender Weise zur Darstellung bringen (Fig. 140). Bei einer bestimmten Temperatur T_1 sollen die Dämpfe von $x\,g$ einer Flüssigkeit ein Volumen einnehmen, welches durch die Strecke OB dargestellt werden möge, und der dieser Temperatur entsprechende Druck sei BB'; er ändert sich nicht, auch wenn wir das Volumen bis auf den Wert OA vermindern, wo die ganze Dampfmenge in den flüssigen Zustand übergegangen ist. Wenn wir dagegen das Volumen über OB hinaus noch vergrößern, nachdem bereits die ganze vorhandene Flüssigkeit verdampft ist, so wird, wie bei den eigentlichen Gasen, wirklich eine Druckverminderung eintreten, und von diesem Punkte B' an tritt auch das Mariotte-Gay-Lussac'sche Gesetz in Kraft. Die zusammengehörigen Druck- und Volumwerte bilden dann die Linie $B'\,T_1$. Bei einer etwas höheren Temperatur T_2 ist der Dampfdruck größer, aber der Bereich constanten Druckes erstreckt sich auf ein engeres Gebiet von Volumveränderungen DE. Es gibt nun bei allen Dämpfen eine bestimmte Temperatur, bei der eine Condensation überhaupt nicht mehr eintritt und jede Volumsverminderung eine Drucksteigerung herbeiführt. Bei noch höheren Temperaturen T_3, T_4 mögen wir dann das Volumen noch so sehr vermindern und damit den Druck noch so hoch steigern, es tritt dann keine Verflüssigung mehr ein; die Grenztemperatur T_K, bei der die Möglichkeit einer Condensation aufhört, bezeichnet man als die kritische Temperatur dieses Dampfes, beziehungsweise dieses Gases.

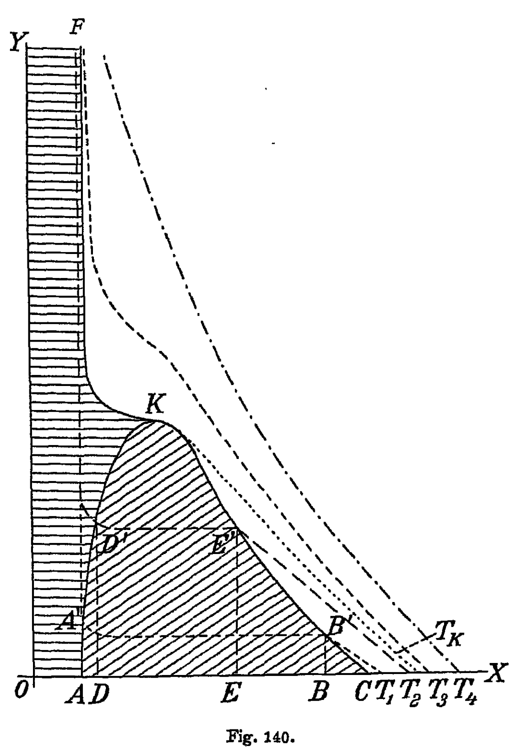


Fig. 140.

Da also bei jeder Temperatur zu einem bestimmten Volumen einer Gasmenge ein ganz bestimmter Druck gehört, so können wir diese beiden Werte durch einen Punkt innerhalb des rechten Winkels XOY darstellen, indem wir die Maßzahl des Volumens auf OX auftragen und im Endpunkte eine Senkrechte gleich der Höhe des Druckes errichten. Dadurch zerfällt diese Winkelfläche in drei Gebiete. Das Gebiet $YOAKF$ enthält nur Punkte, die dem flüssigen Zustande des untersuchten Körpers angehören. Das zweite, bogenförmig begrenzte Stück $AA'D'KE'B'C$ umfasst diejenigen Punkte, welche den Zustand der gesättigten Dämpfe darstellen, die also durch Compression condensiert werden und bei einer Volumsvermehrung aus der noch nicht verdampften Flüssigkeit Zuschuss erhalten.

Dem noch übrigen Gebiete der Winkelfläche gehören diejenigen Punkte an, in welchen die Dämpfe bereits dem Mariotte-Gay-Lussac'schen Gesetze folgen, sich also in jeder Hinsicht wie ein Gas verhalten. Dieses Gebiet entspricht dem Zustande der „überhitzten Dämpfe" oder Gase.

Die kritische Temperatur ist für

Wasser	364° C	Kohlensäure . .	31° C	Luft	—141° C
Chlor	145 „	Sauerstoff . .	—118 „	Stickstoff . . .	—146 „
Ammoniak . . .	131 „	Kohlenoxyd . .	—140 „	Wasserstoff . .	—234 „

Da also die kritische Temperatur einiger Gase so tief liegt, dass man dieselbe lange Zeit hindurch nicht herzustellen vermochte, so glaubte man, dass sie überhaupt nicht condensierbar seien und bezeichnete sie als permanente Gase. Die Bedeutung der kritischen Temperatur stellte zuerst Andrews im Jahre 1869 fest, und im Jahre 1877 gelang es den Physikern Pictet in Genf und Cailletet in Paris einige derselben wenigstens vorübergehend und in geringen Mengen zu verflüssigen, indem sie dieselben stark comprimierten und gleichzeitig bis unterhalb der kritischen Temperatur abkühlten. Wroblewski und Olszewski in Krakau bestimmten dann um das Jahr 1883 die kritischen Temperaturen mehrerer dieser schwer condensierbaren Gase mit Ausnahme des Wasserstoffes und stellten sie auch in größeren Mengen im flüssigen Zustande dar. Endlich gelang es Professor Linde in München im Jahre 1896, einen Apparat zu construieren, der dauernd die Luft flüssig zu machen gestattet, indem er die bei der plötzlichen Druckverminderung eintretende Abkühlung sowohl zur Erzeugung sehr tiefer Temperaturen, als auch zum Vorkühlen der neueintretenden Luft benützte. So gelingt es, relativ schnell die kritische Temperatur beider Bestandtheile der Luft zu erreichen und damit auch ihre Mischung durch Druck zu verflüssigen.

In einem noch höheren Maße, als es bei den festen und flüssigen Körpern der Fall ist, hat die Dichte eines Körpers im gasförmigen Zustande, die sogenannte Dampfdichte, sowohl in physikalischer wie auch in chemischer Hinsicht eine große Bedeutung. Dieselbe wird entweder auf die Dichte der Luft als Einheit, in der Chemie aber auf die Dichte des Wasserstoffes bezogen und letztere gleich 2 gesetzt. Bedeutet m die Masse des in den dampfförmigen Zustand übergeführten Körpers und v sein Volumen, so ist die Dichte $d = \frac{m}{m'}$, wenn m' die Masse eines gleich großen Volumens Luft bedeutet. Da 1 cm³ Luft beim normalen Barometerstand b_0 und bei der Temperatur t ein Gewicht von $\frac{0\cdot001293}{1 + at}$ g hat, so ist für v cm³ beim Luftdrucke b die Masse $m' = \frac{vb}{b_0} \frac{0\cdot001293}{1 + at}$ g und die Dampfdichte $d = \frac{m b_0}{vb} \frac{1 + at}{0\cdot001293}$. Es gibt verschiedene Methoden, um diesen Wert für einzelne Körper zu bestimmen. Nach A. W. Hofmann gibt man mg des zu untersuchenden Körpers in das Torricellische Vacuum und umgibt dann den ganzen Apparat mit einer siedenden Flüssigkeit, bei deren Temperatur t der Körper sicher in Dampfform übergeht. Der Wert v wird an der mit Dampf gefüllten, calibrierten Röhre abgelesen, b wird bestimmt, indem man sieht, wie tief durch die Verdampfung das Barometer gesunken ist. Dumas bringt den Körper in einem Glasballon mit dem Volumen v zum Verdampfen und schmilzt ihn dann zu. Hierauf wird das Gewicht des mit Dampf gefüllten Ballons bestimmt und daraus m berechnet. t ist die Temperatur des Dampfes und b der Barometerstand, während der Ballon verschlossen wurde.

Sublimation. Lässt man flüssige Kohlensäure aus der eisernen Flasche, in der sie gewöhnlich aufbewahrt wird, in einen aus Tuch bestehenden Sack strömen, so schlägt sie sich in demselben wie Schnee nieder, obwohl die Temperatur der Umgebung erwarten ließe, dass sie sofort in den gasförmigen Zustand übergehe. Die beim Ausströmen eintretende Druckverminderung ist aber mit einer derart intensiven adiabati-

schen Abkühlung verbunden, dass ein Theil der ausströmenden Kohlensäure sofort vom gasförmigen in den festen Zustand übergeht.

Eine ähnliche Erscheinung tritt ein, wenn man Schwefel bis zur Verdampfung erhitzt und dann die Schwefeldämpfe in einen hinreichend kühlen Raum leitet. Auch in diesem Falle geht der Schwefel sofort in den festen Zustand über und scheidet sich in Gestalt von Schwefelblumen aus. Diesen unmittelbaren Übergang von der luftartigen in die feste Form bezeichnet man als Sublimation. Ein Beispiel für den entgegengesetzten Vorgang bietet die Verdunstung des Eises, bei der das Wasser unmittelbar vom festen in den dampfförmigen Zustand übergeht.

Die schon bei den gewöhnlichen Druck- und Temperaturveränderungen eintretenden Condensierungs- und Sublimationsvorgänge sind sehr wichtig für das Verhalten der Wasserdämpfe in der atmosphärischen Luft und die damit in Zusammenhang stehenden Erscheinungen der Wolkenbildung, sowie auch für die Entstehung von Regen, Schnee, Thau und Reif.

Die Feuchtigkeit der Luft. Wie die Fortsetzung der Spannkraftstabelle unter 0° C beweist, bilden sich bei jeder Temperatur Wasserdämpfe, aber die in der Atmosphäre auftretenden Strömungen und die damit verbundenen Druck- und Temperaturschwankungen verhindern es oft, dass sich die Wasserdämpfe bis zur vollen Sättigung der Luft anhäufen.

Man bezeichnet nun den in *g* ausgedrückten Wasserdampfgehalt eines m^3 Luft als die absolute Feuchtigkeit. Sie kann in der Weise bestimmt werden, dass man durch einen Aspirator (Fig. 141) eine bestimmte Menge Luft durch mehrere mit Chlorcalcium gefüllte Röhren saugen lässt, die der Luft den ganzen Wasserdampfgehalt entziehen und so durch ihre Gewichtszunahme die auf diese Luft entfallende Wassermenge angeben. Die Hydrometeore d. h. die in der Atmosphäre auftretenden Niederschläge, hängen aber nicht so sehr von der absoluten Feuchtigkeit der Luft, sondern vielmehr davon ab, ob die Wasserdämpfe mehr oder weniger leicht condensierbar sind.

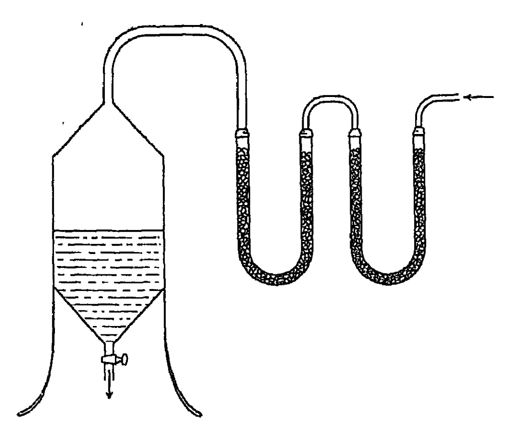


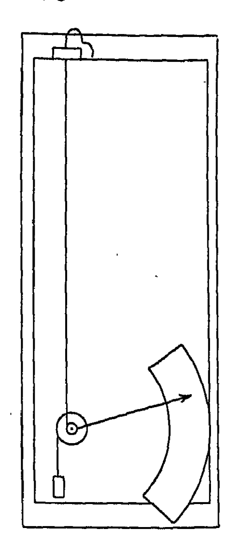
Fig. 141.

Enthält die Luft bei einer bestimmten Temperatur so viel Wasserdämpfe, dass jede Druckerhöhung oder jede Abkühlung zu einer Condensation führt, so sagt man, die Luft sei mit Wasserdämpfen gesättigt. Dies ist der Fall, wenn der von den Wasserdämpfen ausgeübte Druck bei der herrschenden Temperatur dem in der Spannkraftstabelle angegebenen Werte entspricht. Vergleichen wir nun die absolute Feuchtigkeit mit jenem Wasserdampfgehalte, der in derselben Luftmenge enthalten wäre, wenn sie mit Wasserdämpfen gesättigt ist, so gelangen wir zum Begriffe der relativen Feuchtigkeit; man drückt dieses Verhältnis in Procenten aus.

Finden wir z. B. bei einer Temperatur von 25° C, dass 1 m^3 Luft 20 g Wasser enthält, so sagen wir, die absolute Feuchtigkeit sei 20. Wäre die Luft mit Wasserdämpfen gesättigt, so würden dieselben der Spannkrafttabelle zufolge einen Druck von 2·35 cm Quecksilber ausüben. Das Gewicht p eines Liters Luft beträgt nun beim Barometerstande b und bei der Temperatur t in g ausgedrückt $p = \frac{1 \cdot 293}{1 + \alpha t} \cdot \frac{b}{760}$

Da nun das specifische Gewicht des Wasserdampfes auf Luft als Einheit bezogen 0·622 ist und die in 1000 l Luft enthaltenen Wasserdämpfe ein Gewicht von 20 g haben, so üben sie einen Druck b' aus, und es ist $\frac{20}{1000} = 0·622 \frac{1·293}{1 + \alpha t} \cdot \frac{b'}{760}$, also $b' = 2·03$ cm. Der Druck der vorhandenen Wasserdämpfe verhält sich also zu dem bei dieser Temperatur größtmöglichen Druck von 2·35 cm wie 2·03 : 2·35 = 0·86, weshalb die relative Feuchtigkeit in diesem Falle 86% beträgt.

Die relative Feuchtigkeit kann auch mit Hilfe des Hygrometers von Regnault durch Beobachtung des Thaupunktes bestimmt werden. Wenn nämlich die Temperatur eines Körpers so tief sinkt, dass für dieselbe die jeweilig vorhandenen Wasserdämpfe hinreichen, um die Luft mit Wasserdämpfen zu sättigen, so beschlägt sich dieser Körper mit Thau. Wir beobachten nun, bei welcher Temperatur dies geschieht und ermitteln dann aus der Spannkraftstabelle, wie groß bei dieser Temperatur die Spannkraft der Wasserdämpfe ist. So erhalten wir also die Spannkraft der thatsächlich vorhandenen Wasserdämpfe und dann entnehmen wir noch der Spannkraftstabelle die Spannkraft des Wasserdampfes bei der in der freien Natur gerade herrschenden Temperatur, und der mit 100 multiplicierte Quotient gibt uns dann wieder die relative Feuchtigkeit an. Beim früher angeführten Fall würde die Bethauung bereits bei 22·8° C eintreten, und wir entnehmen dann die Feuchtigkeit den bei den Temperaturen von 22·8° und 25° C in der Tabelle angegebenen Spannkraftswerten; sie betragen für 22° C 2·03 cm und für 25° C 2·36 cm.


Fig. 142.

Ein anderes zur Messung der Feuchtigkeit dienendes Instrument ist das Psychrometer von August. Es besteht aus zwei ganz gleichen Thermometern, welche die Ablesung der Temperatur bis auf 0·1 C° gestatten. Das eine derselben ist der Luft unmittelbar zugänglich, das andere ist mit Muselin, also mit einem Stoff umgeben, welcher wie der Docht einer Lampe aus einer darunter befindlichen Schale Wasser aufsaugt und davon um so mehr zur Verdunstung bringt, je trockener die Luft ist. Bei sehr trockener Luft wird also dem umhüllten Thermometer viel mehr Wärme entzogen und die beiden Thermometer werden eine desto größere Temperaturdifferenz anzeigen. In einer dem Psychrometer beigegebenen Tabelle findet man dann für jede Temperatur und jeden Luftdruck die relative Feuchtigkeit angegeben, welche einer bestimmten Differenz der beiden Thermometerangaben entspricht.

Das einfachste und bequemste Instrument zur Messung der Feuchtigkeit ist das Haarhygroskop von Saussure. (Fig. 142.) Viele Körper, wie z. B. das Steinsalz, die Darmsaiten u. a., haben nämlich die Eigenschaft, aus der Luft Feuchtigkeit aufzunehmen, und zwar umso stärker, je mehr sie mit Wasserdämpfen gesättiget ist. Solche Körper bezeichnet man als hygroskopisch. Diese Eigenschaft hat auch das entfettete Menschenhaar, und zwar dehnt es sich bei zunehmender Feuchtigkeit aus und zieht sich unter dem Einfluss der trockenen Luft zusammen. Diese Verlängerungen und Verkürzungen werden nun auf einen Zeiger übertragen, der dann auf einer empyrisch geaichten Scala die entsprechenden Feuchtigkeitsgrade angibt.

Die atmosphärischen Niederschläge oder Hydrometeore. Die Erwärmung der atmosphärischen Luft erfolgt entweder dadurch, dass der Erdboden durch die Sonne erwärmt wird und dann seine Wärme der Luft mittheilt, durch Verdichtung bei rasch zunehmendem Barometerstande oder endlich durch die bei den Condensationen der Wasserdämpfe freiwerdende Wärme. Dementsprechend sind auch die Abkühlungen entweder die Folge der durch die sogenannte Strahlung in den luftleeren Weltraum entweichenden Erdwärme, der Verdünnungen der Luft bei abnehmendem Barometerstand und der Verdunstung des Wassers an der Oberfläche der Erde und in der Luft.

Es ist also leicht möglich, dass ausgedehnte Gebiete relativ trockener Luft durch derartige Veränderungen in der Atmosphäre bis zur vollen Sättigung mit Wasserdämpfen abgekühlt werden und dann bei noch fortgesetzter Abkühlung oder zunehmendem Luftdruck eine Condensation der Wasserdämpfe eintritt. Ist die relative Feuchtigkeit groß genug, dass die Condensation bereits oberhalb der Temperatur 0° C eintritt, so tritt zuerst Nebelbildung ein, die bei zuehmender Steigerung zur Bildung von Regentropfen führt. Damit sich die Wasserdämpfe aus der Luft als Schnee ausscheiden, muss die relative Feuchtigkeit der Luft so gering sein, dass die Condensierung oder vielmehr die Sublimation erst unter 0° C beginnen kann, weshalb bei dieser Temperatur die Spannkraft der Wasserdämpfe noch nicht 0·46 cm Quecksilber erreichen darf. Die sich in fester Form ausscheidenden Wasserdämpfe bilden dann schöne, sechseckige Sterne mit mannigfach verändertem Bau (Fig. 143) und erreichen oft eine Größe bis gegen 2 cm Durchmesser.

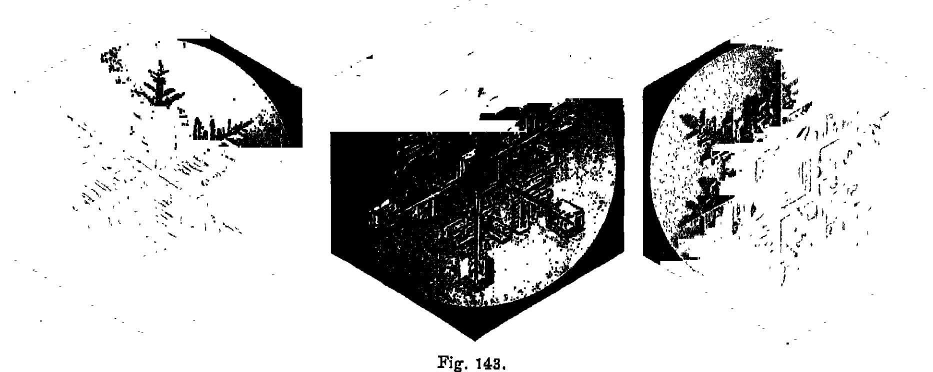


Fig. 143.

Schneesterne nach Prof. G. Hellmann's „Schneekrystalle". Berlin 1893.

Ein ähnlicher Unterschied besteht zwischen der Thau- und Reifbildung. Von Regen und Schnee unterscheiden sie sich dadurch, dass hier die Condensation durch die niedere Temperatur fester Körper hervorgerufen wird, welche besonders bei klarem Himmel viel rascher abkühlen, als die sie umgebende Luft. Auch in diesem Falle setzt die Entstehung des Reifes eine sehr geringe relative Feuchtigkeit voraus. Die sich bildenden Krystalle gehören wieder dem hexagonalen Systeme an. Es kommt auch manchmal vor, dass die schon gebildeten Thautropfen durch rasches Sinken der Temperatur unter 0° C zu Eiskügelchen gefrieren, die aber nicht mehr als Reif bezeichnet werden können.

Der Zusammenhang der Hydrometeore mit den Erscheinungen in der gesammten Atmosphäre wird in der „Meteorologie" eine eingehendere Erörterung finden.

Die calorischen Maschinen.

Unter einer calorischen Maschine versteht man jede Vorrichtung, bei welcher Wärme in Arbeit oder Arbeit in Wärme umgesetzt wird. Die wichtigste derselben ist die Dampfmaschine, denn der Aufschwung der Industrie und des Verkehrswesens in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts ist zum großen Theile ein Erfolg ihrer stetig fortschreitenden Verbesserung.

Die beim Verbrennen des Heizmateriales, meistens der Steinkohlen, sich entwickelnden, heißen Gase werden mittels eines Röhrensystems durch das im Kessel verschlossene Wasser geleitet und geben dabei einen großen Theil ihrer Wärme an dasselbe ab. Man bemisst die Leistungsfähigkeit eines Kessels nach der Größe der „Heizfläche“, also nach dem Flächeninhalte der Metallwände, durch welche das Wasser erwärmt wird. Der Kessel muss sorgfältig gegen die zerstörende Wirkung des beim Verkochen des Wassers sich bildenden Kesselsteines geschützt werden und darf an keiner Stelle von den heißen Verbrennungsgasen bespült werden, die inwendig nicht vom Wasser benetzt sind. Die Berührung des Wassers mit glühenden Kesselwänden kann wie beim Leidenfrost'schen Phänomen zu einer sehr heftigen Dampfentwicklung führen; wenn aber die Spannkraft der Dämpfe die Festigkeit des Kessels überwindet, so tritt eine Kesselexplosion ein, die für die ganze Umgebung von den verheerendsten Folgen begleitet ist. Alle Dampfkessel müssen daher vor der Verwendung und auch später von Zeit zu Zeit untersucht werden, ob sie sich im tadellosen Zustande befinden.

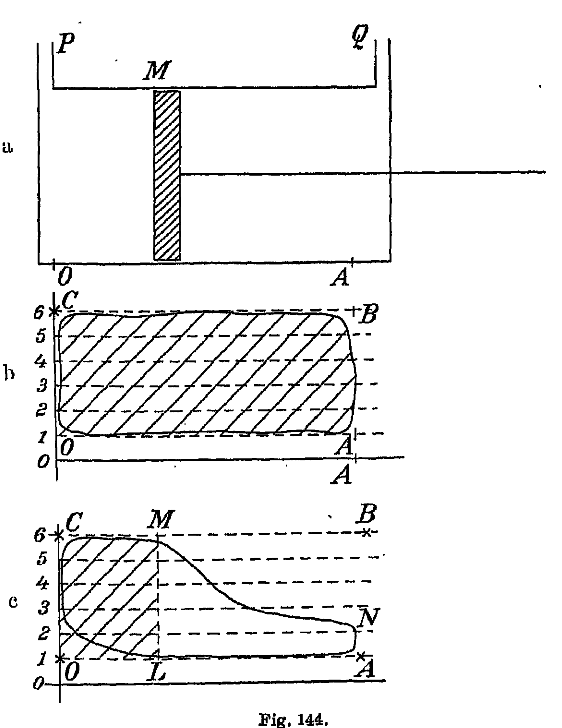


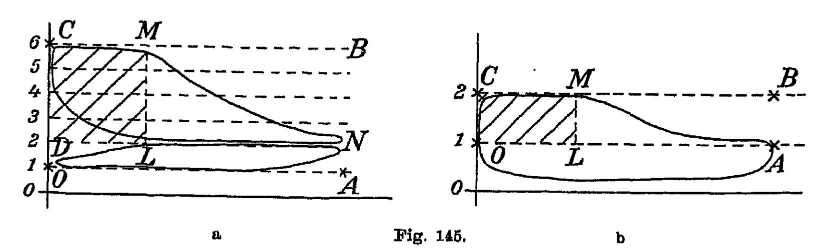
Fig. 144.

Der Druck im Kessel wird durch ein Manometer angegeben, und sein Verhältnis zur Temperatur, die der Dampf dabei besitzt, gibt wieder die Spannkrafttabelle an. Das Innere des Kessels steht durch eine Röhre mit dem Dampfcylinder in Verbindung, in dem der Kolben eine verschiebbare Wand bildet, und die Arbeit, die der Dampf bei jeder Verschiebung leistet, wird durch Riemen oder Räder auf andere Maschinen übertragen, und in nutzenbringender Weise verwertet.

Bei den meisten Dampfmaschinen sucht man zunächst eine oscillierende Bewegung herbeizuführen. Setzen wir also den Cylinderraum (Fig. 144 a) durch den Canal P mit einem Dampfkessel in Verbindung, in welchem sich z. B. Dampf von sechs Atmosphären Druck befindet, so wird er, abgesehen von den Reibungswiderständen, mit einer Kraft von O nach A verschoben, die gleich ist dem mit der Fläche des Kolbens multiplicierten Druck pro cm^2; ist z. B. seine Fläche gleich 1000 cm^2, so beträgt also diese Kraft, wenn wir jede Atmosphäre in runder Zahl zu 1 kg berechnen, 5000 kg, da von den 6 Atmosphären Kesseldruck eine durch den Gegendruck der Luft aufgehoben wird.

Hat endlich der „Kolbenhub“ eine Länge von 0·4 m, so ist die bei einem Hub geleistete Arbeit 2000 kgm. Graphisch wird dieselbe in Fig. 144 b durch das Rechteck $OABC$ dargestellt. Würde aber der Kolben mit dem vollen Kesseldruck von O nach A verschoben, so wäre das mit einer sehr großen Dampfvergeudung verbunden. Man schneidet daher die Dampfzufuhr bereits ab, wenn der Kolben erst $^1/_3$ seines Weges zurückgelegt hat, und lässt also den Cylinder nur mit „$^1/_3$ Füllung“ arbeiten; dann wird zwar der Überdruck des Dampfes zwischen M und B (Fig. 144 c) von LM bis AN abnehmen, aber sich ausdehnend oder „expandierend“ dennoch eine Arbeit leisten, welche durch die Fläche $LANML$ dargestellt wird. Man bezeichnet daher eine solche Maschine als „Expansionsmaschine“. Die Fläche $OANMCO$, welche die bei jedem Hub geleistete Arbeit angibt, bezeichnet man als das „Indicatordiagramm“ und den oft in Pferdekräften ausgedrückten Effect, welchen der Dampf im Cylinder leistet, als die „indicierten“ Pferdekräfte. Von diesem Effecte geht aber noch ein großer Theil durch Reibung verloren, und daher nennt man, zum Unterschiede von diesem, den am Triebrad der Maschine verfügbaren Effect als die „effectiven“ Pferdekräfte. Letztere werden durch Bremsen mittels des Prony'schen Zaumes gemessen.

Eine noch bessere Ausnützung des Dampfes kann man dadurch erzielen, dass man ihn am Ende des Hubes nicht in die freie Luft entweichen, sondern in einen zweiten Cylinder einströmen lässt, dessen Kolben eine etwas größere Oberfläche hat, sodass er trotz der geringeren Spannung immerhin noch die gleiche Kraft entfalten kann. Man spricht dann von einer zweifachen (Fig. 145 a), und wenn dann der Dampf noch



a Fig. 145. b

in einem dritten Cylinder zur Expansion gelangt, von einer dreifachen Expansion.

Ein weiteres Mittel, um die Leistungsfähigkeit einer Dampfmaschine zu steigern, ohne den Dampfverbrauch zu erhöhen, ist die Anwendung des „Condensators“. Wenn man nämlich den verbrauchten Dampf in einen allseitig verschlossenen Behälter strömen lässt, indem er durch kaltes Wasser condensiert wird, so sinkt hier der Druck ziemlich tief unter eine Atmosphäre, und die Spannkraft des Dampfes hat dann beim Verschieben des Kolbens einen viel geringeren Gegendruck zu überwinden. Durch Anwendung der Condensation wird die Fläche des Diagrammes bis unter die Drucklinie der ersten Atmosphäre OA erweitert (Fig. 143 b) und damit ohne neue Dampfzufuhr vergrößert. Die schraffierte Fläche stellt bei allen diesen Diagrammen den der geleisteten Arbeit entsprechenden Dampfverbrauch dar.

Da ein zweimaliger Kolbenhub zu einer einzigen Umdrehung der Kurbelwelle führt, so ist die bei derselben geleistete Arbeit gleich $2pfh$ kgm, wenn p den Überdruck in kg pro cm², f den Flächeninhalt in cm² und h die Höhe des Hubes in m bedeutet. Bei n Touren in der Minute ist dann der Effect, also die Arbeit pro Secunde, $2nfph/60 \frac{\text{kgm}}{\text{sec}} = npfh/2250$ Pferdekräfte $= 0{\cdot}327\ npfh$ Watt. Beim früher angeführten Beispiel erhalten wir also für 100 Touren pro Minute eine Leistung von $0{\cdot}327 \,.\, 100 \,.\, 5 \,.\, 1000 \,.\, 0{\cdot}4 = 65400$ Watt. Dieser Effect wird aber thatsächlich nicht vollständig erzielt, erstens weil sich die Fläche des Indicatordiagrammes nicht auf das ganze Rechteck $OABC$ (Fig. 144 b) erstreckt und zweitens weil ein ziemlich großer Theil durch die Reibung verloren geht.

Um die oscillierende Kolbenbewegung in eine drehende Bewegung zu verwandeln, wird die Kolbenstange durch den „Kreuzkopf“ K (Fig. 146) mit der „Pleuelstange“ KL gelenkartig verbunden, und diese überträgt dann erst die Bewegung auf die Kurbelwelle W. Jede derartige Verwandlung einer oscillierenden Bewegung in eine drehende Bewegung hat nun mit der Schwierigkeit zu kämpfen, wie der „todte Punkt“ überwunden werden soll. Unter dem „todten Punkt“ versteht man jene Stellung der Kurbelwelle (bei A und B), bei welcher der Zug oder Druck der Pleuelstange durch die Achse der Welle hindurch geht, und daher kein Drehmoment um dieselbe, sondern nur einen Druck senkreckt gegen die Achse zu erzeugen vermag. Bei den eincylindrigen Maschinen wird diese Schwierigkeit dadurch überwunden, dass man mit der Kurbelwelle ein schweres Schwungrad in Verbindung bringt, welches vermöge seiner kinetischen Trägheit den ganzen Mechanismus rasch über den todten Punkt hinwegschiebt; zweicylindrische Maschinen werden dagegen so eingerichtet, dass beide Kolben

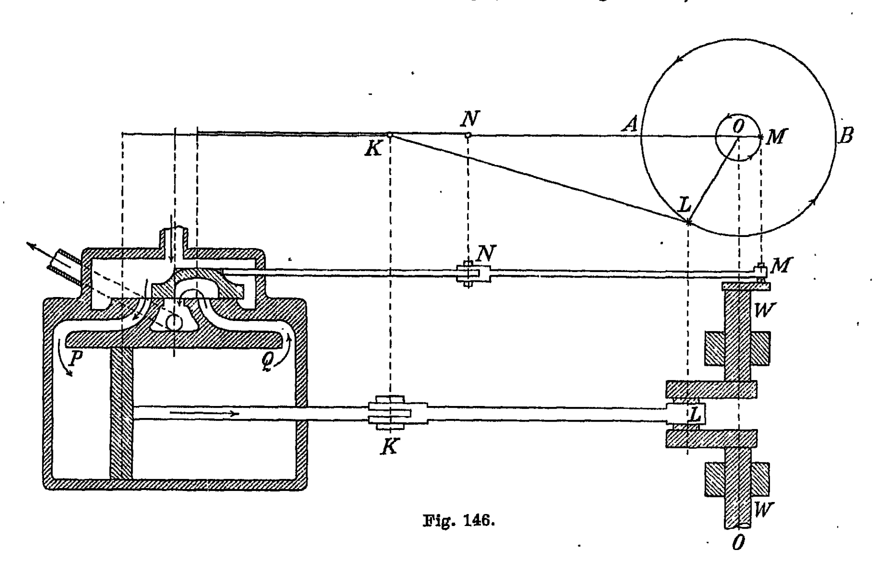


Fig. 146.

mit einem Phasenunterschiede von 90° auf dieselbe Welle wirken und daher der eine Kolben mit dem vollen Drehmomente arbeitet, während der andere im todten Punkte angelangt ist.

Die rechtzeitige Dampfzufuhr durch die Canäle P und Q wird durch sehr verschiedenartig eingerichtete Steuerungsvorrichtungen besorgt, die von der Kurbelwelle aus in Bewegung versetzt werden. Nach Figur 146 geschieht dies in der Weise, dass die mit Kolben und Schieber verbundenen Punkte L und M auf Halbmessern liegen, die miteinander einen unveränderlichen Winkel LOM bilden.

Größere Fabriken werden durch die im Maschinenhause untergebrachten „Locomobilen“ betrieben und erfordern in der Regel einen gleichmäßigen Gang. Die Dampfmaschine braucht also immer nur im selben Sinne zu laufen und soll auch bei wechselnder Belastung stets dieselbe Tourenzahl einhalten. Um dies zu erreichen, wird die Dampfzufuhr durch Centrifugalregulatoren vergrößert oder verkleinert, sobald der Gang der Maschine ein zu langsamer oder ein zu rascher wird.

Bei der „Locomotive“ ist dagegen eine große Veränderlichkeit der Tourenzahl und die sofortige Umkehrbarkeit des Drehungssinnes ein Haupterfordernis. Die Steuerung der beiden Dampfcylinder muss dann so eingerichtet sein, dass die beiden Kolben einen Phasenunterschied von 90° haben, und die Dampfcanäle müssen ihre Rolle jederzeit vertauschen können, wodurch der Drehungssinn des Triebrades und daher auch die Bewegungsrichtung der Maschine geändert wird (Umsteuerung).

In neuester Zeit ist man mit sehr guten Erfolgen daran gegangen, die Triebkraft des Dampfes auch in der Weise auszunützen, dass man den Dampf durch enge Düsen gegen ein turbinenartiges Schaufelrad streichen lässt; dadurch erreicht man außerordentlich hohe Tourenzahlen, was in mannigfacher Hinsicht große Vortheile bietet.

Diese zuerst von De Laval construierten Dampfturbinen nehmen im Vergleich zu den anderen Dampfmaschinen mit gleicher Leistung sehr wenig Raum in Anspruch und zeichnen sich durch geringen Dampfverbrauch aus. Auch tritt bei denselben kein todter Punkt auf und, da sie keine oscillierenden Theile besitzen, so ist ihr Gang ein sehr ruhiger. Die Unterscheidung in Niederdruck- und Hochdruckmaschinen besagt nur, dass im ersten Falle die Kesselspannung weniger als etwa 3 Atmosphären beträgt und oft noch durch die Wirkung eines Condensators unterstützt wird, was bei den Hochdruckmaschinen gewöhnlich nicht geschieht.

Unter dem Nutzeffect einer Arbeitsmaschine versteht man den Quotienten aus der ihrem Zwecke wirklich zugeführten Energie und jener Energie, welche die Maschine gleichzeitig aufnimmt.

Durchschnittlich verbraucht eine größere Dampfmaschine für jede Pferdekraft 1 kg sehr guter Kohle pro Stunde. Die Verbrennung dieser Kohlenmenge liefert 8000 Calorien in jeder Stunde, was einer Leistung von 12·5 Pferdekräften gleichkommt. Der Nutzeffect beläuft sich also nur auf $1:12{\cdot}5 = 0{\cdot}08$ oder auf $8^0/_0$. In den günstigsten Fällen werden bei Cylindermaschinen gegen $12^0/_0$ erzielt, während die Dampfturbinen bereits viel größere Nutzeffecte aufweisen.

Eine wesentlich verschiedene Construction weisen andere Kraftmaschinen neuerer Art auf, nämlich die Gas- und Benzinmotoren. Alle derartigen Maschinen beruhen auf der Ausnützung der beim Verbrennen explosibler Gase sich entwickelnden lebendigen Kraft. Bei den Gasmotoren wird das Leuchtgas während des ersten Kolbenhubes, im Verhältnis 1 : 10 mit Luft gemischt, in den Cylinderraum gebracht und dann beim Niedergang des Kolbens stark comprimiert. Hierauf wird die Mischung durch eine Flamme zur Entzündung gebracht und die dabei vom explodierenden Gase geleistete Arbeit auf den Kolben übertragen, der dann die Welle sammt einem sehr kräftigen Schwungrade in Drehung versetzt. Diese lebendige Kraft muss nun hinreichen, nicht nur die nutzbringende Arbeit zu leisten, sondern noch beim nächsten Niedergang des Kolbens die Verbrennungsproducte auszustoßen, eine neue Mischung aufzusaugen und durch Compression wieder für die Entzündung vorzubereiten. Bei den Petroleum- und Benzinmotoren verwendet man statt des Leuchtgases oder anderer leicht explodierbarer Gase sehr fein zerstäubtes Petroleum oder Benzin, und es ist bereits gelungen, diese Motoren so einzurichten, dass sich die explosible Mischung von selbst zur rechten Zeit entzündet. Ein großer Vorzug aller derartigen Motoren ist, dass sie keiner Kesselanlage bedürfen und damit entfällt auch die Wartung und Pflege derselben. Dagegen bewegt sich ihre Wirksamkeit nur in einem Gebiet von meist weniger als hundert Pferdekräften. Sie eignen sich daher mehr zum Betriebe im Kleinen, besonders wenn derselbe oft unterbrochen werden muss.

Schon im 2. Jahrhundert vor Christus ließ der durch seine zahlreichen Erfindungen berühmte Hero von Alexandrien eine mit Wasser gefüllte und von außen durch Feuer erwärmte Kugel vom ausströmenden Dampfe nach Art des Segner'schen Wasserrades in Drehung versetzen. Denselben constructiven Fehler, nämlich den beweglichen Theil der Maschine selbst als Dampfkessel zu benützen, machte noch im 17. Jahrhundert Papin, der Erfinder des nach ihm benannten Papin'schen Topfes, indem er den Dampfcylinder selbst mit Wasser füllte und so den Kolben vom entwickelten Dampfe heben ließ. Durch Condensation wurde dann der Kolben wieder zurückgeschoben. Die Trennung des Cylinders vom Kessel führten zuerst die Engländer Newkomen und Cowley im Jahre 1690 durch, regulierten aber noch die Dampfbewegungen durch das Öffnen und Schließen von Hähnen. Die automatische Regulierung der Dampfzufuhr soll ein Knabe Namens H. Rotter erfunden haben, der mit der Wartung der Hähne betraut war. Damit war aber auch die Steuerung erfunden, durch welche die Dampfmaschine zur selbstthätigen Arbeitsmaschine wurde. Die technische Ausbildung derselben ist nun großentheils ein Werk des Mechanikers James Watt, dem zu Ehren die praktische Effecteinheit ihren Namen erhielt. Die meisten seiner diesbezüglichen Erfindungen fallen in den Zeitraum 1769—1800. Die wichtigsten derselben sind das beiderseitige Einströmen des Dampfes in den Cylinder, Anwendung von Pleuelstange und Schwungrad, Centrifugalregulator, Ventil- und Schiebersteuerung. Die erste Expansionshochdruckmaschine mit $^1/_3$ Füllung baute Evans.

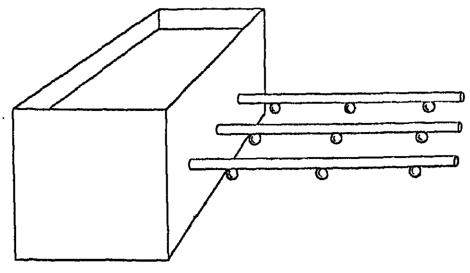
Die zweicylindrigen Zwillingsmaschinen kamen seit 1804 in Gebrauch, und im Jahre 1807 verwendete Fulton das erste Mal die Dampfmaschine, um damit ein Schiff in Bewegung zu setzen. Stephenson erfand die Umsteuerung und construierte im Jahre 1814 die erste brauchbare Locomotive. Die erste Eisenbahnfahrt fand im Jahre 1825 zwischen Stockton und Darlington statt. Dampfmaschinen mit mehrfacher Expansion sind erst seit 1860 in Verwendung; mit der Erfindung der Laval'schen

Dampfturbine ist die Construction von Dampfmaschinen abermals in ein neues Stadium getreten.

Die Eismaschinen. Während alle bisher erwähnten calorischen Maschinen den Zweck verfolgen, die bei irgend einem Verbrennungsprocesse entwickelte Wärme in mechanische Arbeit zu verwandeln, wird bei den Eiserzeugungsmaschinen die mechanische Energie benützt, um durch eine künstlich erzwungene Verdampfung dem Wasser so viel Wärme zu entziehen, dass es gefriert. Um 1 l Wasser von 20° C in Eis zu verwandeln, müssen ihm zunächst 20 Calorien entzogen werden, damit seine Temperatur auf 0° C sinkt und dann noch 80 Calorien, um das Wasser in Eis zu verwandeln. Wenn wir nun den auf dem Wasser lastenden Druck bei 20° C bis auf 1·7 cm Quecksilber vermindern, so beginnt es zu sieden, und dann sind zur vollständigen Verdampfung pro 1 536 Calorien nothwendig, die dem Wasser selbst entzogen werden, wenn der Siedeprocess rasch genug von statten geht. Diese Verdampfungswärme reicht also hin, um etwa 5 kg Wasser von 20° C in Eis zu verwandeln. Auf diesem Wege hat zuerst Harrison 1856 das Eis fabriksmäßig hergestellt. Bei der Eismaschine von Carrè wird dieselbe Wirkung auf folgendem Wege erzielt. Das Ammoniakgas wird vom Wasser bei niedrigen Temperaturen in sehr großen Mengen absorbiert, aber bei höheren Temperaturen wieder ausgeschieden. Befindet sich also in zwei durch eine Röhre miteinander verbundenen Gefäßen Ammoniaklösung, so können wir durch die Erwärmung des ersteren Gefäßes die Ammoniakdämpfe nach dem kaltgehaltenen zweiten Gefäße befördern, wo sie condensiert werden. Wenn wir dann das erstere wieder abkühlen, so wird das im zweiten condensierte Ammoniak derart rasch verdampfen, dass die dabei auftretende Kälte hinreicht, um das mit dem Gefäß in Berührung befindliche Wasser zum Gefrieren zu bringen. Während also im ersteren Falle die Wärmeentziehung durch ein kräftiges Pumpwerk herbeigeführt wurde, wird hier die Condensation des Ammoniaks benützt, um ebenfalls zunächst eine starke Verdampfung und dadurch eine starke Temperaturerniedrigung zu erzielen.

Ausbreitung der Wärme.

Wärmeleitung. Schon um das Jahr 1789 suchte der englische Arzt Jan Ingen-Houss die Ausbreitung der Wärme messend zu verfolgen, und von ihm stammt im wesentlichen der folgende Versuch. Es werden mehrere gleich lange Stäbe, z. B. einer aus Kupfer, einer aus Eisen und einer aus Glas, in einem Behälter befestiget, welcher siedendes Wasser enthält (Fig. 147). An jedem derselben werden mit Wachs mehrere Bleikugeln in gleicher Entfernung befestiget. Das Wasserbad sorgt dafür, dass auf der einen Seite überall dieselbe Temperatur herrsche, und von hier aus pflanzt sich die Wärme in den einzelnen Stäben mit verschiedener Geschwindigkeit fort. Das allmähliche Abfallen der Kugeln ist also ein Zeichen, dass die Stäbe an der betreffenden Stelle überall dieselbe Temperatur erreicht haben. Während nun von einem mäßig langen Kupferstabe bereits alle Kugeln abgefallen sind und am gleich langen Eisenstabe nur noch eine haftet, wird vom Glasstabe noch keine einzige herabgefallen sein.


Fig. 147.

Dieser Versuch zeigt, dass sich die Wärme im Kupfer viel schneller ausbreitet als im Eisen, und in diesem noch rascher als im Glase.

Die auf einen cm der Stabachse entfallende Temperaturdifferenz bezeichnet man als das „Temperaturgefälle“. Durch eine sorgfältige Beobachtung des Temperaturgefälles lässt sich nun der Einfluss des Materiales auf die Ausbreitung der Wärme folgendermaßen zum Ausdrucke bringen.

Wir bezeichnen als inneres Wärmeleitungsvermögen die Anzahl von Calorien, welche in jeder Secunde durch 1 cm^2 hindurch fließen, falls die Temperatur von cm zu cm um 1° C abnimmt.

Die Wärme pflanzt sich aber nicht nur längs der Achse des Stabes fort, sondern sie theilt sich auch der umgebenden Luft mit, und daher bezeichnet man diejenige Anzahl von Calorien, welche in einer Secunde durch 1 cm^2 der Oberfläche entweichen, wenn außerhalb eine um 1° C niedrigere Temperatur herrscht, als das äußere Wärmeleitungsvermögen.

Da sich die Körper in dieser Hinsicht sehr verschieden verhalten, so unterscheidet man gute und schlechte Wärmeleiter. Dieser Unterschied ist aber nur als ein relativer aufzufassen, das heißt, es gibt keinen Körper, der die Wärme gar nicht leitet, und auch keinen, der sie ohne Zeitverlust, also plötzlich fortleitet.

Im allgemeinen besitzen die Metalle ein viel besseres Leitungsvermögen als die Nichtmetalle und werden daher als gute Wärmeleiter bezeichnet. Bei Flüssigkeiten und Gasen ist das Wärmeleitungsvermögen viel geringer.

So ist z. B. das Wärmeleitungsvermögen für

Silber	1·1	Schnee	0·0005	Sauerstoff	0·000056
Kupfer	1·00	Wasser	0·00125	Stickstoff	0·000052
Eisen	0·14	Alkohol	0·00048	Wasserstoff	0·000358
Wismut	0·017	Petroleum	0·00035		
Glas	0·0016	Luft	0·000053		

Insoferne also der Wasserstoff die Wärme fast 7 mal besser leitet als die Luft, ist er im Vergleich zu dieser ein guter Wärmeleiter. Das schlechte Wärmeleitungsvermögen sehr vieler Körper, wie z. B. von Watta, Wolle und Stroh, welche dazu verwendet werden, um Gegenstände vor stärkeren Wärmeverlusten zu bewahren, ist hauptsächlich dem schlechten Wärmeleitungsvermögen der Luft zuzuschreiben, die sie in ihren zahlreichen Zwischenräumen enthalten. Auf dieselbe Ursache ist auch die Wirkung „warmer" Kleider zurückzuführen, die uns vor größeren Verlusten an Körperwärme schützen. — Andererseits kann man das gute Wärmeleitungsvermögen der Metalle benützen, um möglichst rasch niedrigere Temperaturen hervorzurufen. Darauf beruht die Davy'sche Sicherheitslampe, bei der die Flamme von zwei engmaschigen Drahtgittern umgeben ist, weil dann die brennbaren Gase in den Kohlenbergwerken an keiner Stelle so erwärmt werden, dass dadurch eine Entzündung derselben hervorgerufen werden könnte. Durch ein engmaschiges Drahtgitter kann man sogar die sehr heiße Flamme eines Bunsenbrenners eben abschneiden, weil das Metallgitter soviel Wärme seitlich ableitet, dass sich die durch das Gitter aufsteigenden, noch brennbaren Gase oberhalb desselben nicht mehr entzünden.

Wärmeconvection. Bei Flüssigkeiten und Gasen pflanzt sich die Wärme oft viel rascher fort, als es dem Wärmeleitungsvermögen nach zu erwarten wäre. Wenn man in eine mit Wasser gefüllte Probette ein Stück Eis gibt, welches man mit einem Bleidraht umwickelt, damit es im Wasser zu Boden sinkt, so kann das Wasser im oberen Theil der Probette zum Sieden gebracht werden, ohne dass das Eis im unteren Theile zergeht. Das Eisstück wird aber viel rascher zerfließen, wenn man dasselbe auf dem Wasser schwimmen lässt und den unteren Theil der Probette erwärmt. Wenn die Erwärmung von unten erfolgt, so steigt die erwärmte Flüssigkeit und noch leichter ein erwärmtes Gas infolge der starken Ausdehnung rasch empor und die noch kühleren Flüssigkeits- oder Gasmengen treten an jene Stelle, wo sie am schnellsten erwärmt werden. Die so hervorgerufene Bewegung hat also dieselbe Wirkung, wie wir sie auch erzielen könnten, wenn wir die ganze Masse rasch nacheinander an den verschiedensten Stellen und besonders dort am stärksten erwärmen würden, wo sie am kältesten ist. Wenn dagegen die Erwärmung von oben ausgeht, so tritt keine Strömung ein und die Wärme muss sich dann fortpflanzen, wie in einem festen Körper. Die Wärmeconvection besteht also darin, dass die allmälige Temperatursteigerung entsprechend der Geschwindigkeit der Strömung sich rascher ausbreitet, und gerade deshalb spielt sie bei der Temperaturvertheilung in größeren Gewässern, besonders aber in der Atmosphäre eine wichtige Rolle.

Wärmestrahlung. In der Optik werden wir uns mit der Ausbreitung des Lichtes befassen und dabei beobachten, dass sich dasselbe in einem durchwegs gleichartigen Mittel und besonders im luftleeren Raume in geradlinigen Strahlen fortpflanzt. Gelangen aber die Strahlen an eine glatte Oberfläche, so werden sie reflectiert, und wenn sie vom luftleeren Raume in einen durchsichtigen Körper oder von einem durchsichtigen Körper in einen anderen übertreten, so werden sie unter Umständen von ihrer Richtung abgelenkt und erleiden also eine „Brechung". In ähnlicher Weise vermag sich nun auch die Wärme auszubreiten, und zwar auch dann, wenn sich zwischen der Wärmequelle und dem erwärmten Körper kein dritter wägbarer Körper befindet, welcher die Vermittlung übernehmen könnte. In diesem Falle spricht man von Wärmestrahlung oder von strahlender Wärme. Die Hitze, die wir in geringer Entfernung eines stark geheizten Ofens wahrnehmen, wird uns nur zum geringsten Theile durch Leitung, zumeist aber durch Strahlung zugeführt. Auch die ungeheueren Wärmemengen, welche die Sonne der Erde zusendet, gelangen durch Strahlung zu uns. Da sich die Gesetze der Strahlung nur aus der Wellentheorie in befriedigender Weise erklären lassen, so werden wir erst nach Behandlung der Lehre vom Lichte in der Lage sein, die strahlenartige Ausbreitung der Wärme als solche experimentell nachzuweisen und ihre Eigenschaften nach der Wellenlehre zu begründen. Daraus werden wir dann folgern, dass die Wärme, die wir schon als eine Form von „Arbeit" kennen gelernt haben, sich auch wellenförmig ausbreiten kann und mit einer oscillierenden Bewegung der erwärmten Massen verbunden ist. Dafür spricht auch die Existenz eines absoluten Nullpunktes der Temperatur, der also dann vorhanden ist, wenn auch die kleinsten Massentheilchen innerhalb eines Körpers keine schwingende Bewegung mehr ausführen.

Die beiden Hauptsätze der mechanischen Wärmetheorie.

Unter dem ersten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie versteht man den Satz, dass eine Calorie mechanisch gleichwertig ist einer Arbeit von 425 kgm oder 417 Joule. Hieraus folgt zunächst, dass Wärmemenge und Arbeit sich nur in ihren Erscheinungsformen unterscheiden. Da ferner die mechanische Arbeit ohne Bewegung nicht denkbar ist, so müssen wir annehmen, dass ein warmer Körper, auch wenn er sich scheinbar vollkommen in Ruhe befindet, aus Theilchen bestehe, die sich fortwährend in Bewegung befinden, und die lebendige Kraft aller dieser Theilbewegungen entspricht dann der in Calorien messbaren Wärme. Da sich nun jeder Temperaturunterschied zwischen benachbarten Körpern theils durch Wärmeleitung, theils durch Wärmestrahlung allmählich ausgleicht, so ist es theoretisch unmöglich, auch nur auf kurze Zeit eine in Wärme umgesetzte Arbeit vor jeglichem Verluste zu bewahren. Es ist daher auch nicht möglich, die ganze so entwickelte Wärmemenge wieder zu einer Arbeitsleistung heranzuziehen, die der ursprünglichen vollkommen gleichkäme. Wenn wir z. B. die Luft im pneumatischen Feuerzeuge so rasch zusammendrücken, dass ein Stück Zündschwamm zu brennen beginnt, so wird der Stempel allerdings durch den Druck der erwärmten Luft schnell wieder zurückgestoßen, aber ein Theil der Wärme wurde bereits zur Erwärmung der Glaswände verbraucht und entweicht durch dieselben, ohne dass wir dies verhindern könnten. Jede Verwandlung von einer Energieform in eine

andere ist also mit Wärmeerzeugung verbunden und führt daher auch zu den mit der Wärmezerstreuung oder Wärmedissipation verknüpften Energieverlusten. Diese Thatsache bezeichnet man nun als den zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie und spricht denselben auch mit den Worten aus: Es ist unmöglich, eine bestimmte Arbeitsmenge ohne Wärmeerzeugung und damit verbundene Energieverluste wieder in der früheren Energieform herzustellen. Der fortwährende Energieumsatz in der Natur arbeitet also unablässig auf einen vollständigen Wärmeausgleich hin, mit dem jede Temperaturdifferenz und daher auch jede andere Bewegungsenergie erlischt.

Wärmequellen.

Vom Standpunkte der mechanischen Wärmetheorie kann man den eben erwähnten Hauptsätzen zufolge nur in dem Sinne von Wärmequellen reden, als eine andere Energieform bei irgend einem physikalischen Processe in Wärme umgesetzt wird. In diesem Sinne sucht auch J. Robert Mayer in seinem Werke: „Beiträge zur Dynamik des Himmels" die Sonnenwärme daraus zu erklären, dass er die lebendige Kraft der auf die Sonne stürzenden Meteore abschätzt und mit der Verbrennungswärme der Kohle vergleicht. Eine andere Art von Wärmequellen liefern sehr viele chemische Processe. Aber auch hier reicht die Wärmequelle nur so lange aus, als die zur Herbeiführung dieser Processe nöthigen Materialien vorhanden und uns auch zugänglich sind.

Beschränken wir uns also auf die Frage, welche Wärmequellen für die Erde in Betracht kommen, so müssen wir erstens auf die kosmischen, zweitens auf die chemischen und drittens auf die physikalischen Wärmequellen verweisen.

Von den kosmischen Wärmequellen ist für das Leben auf der Erdoberfläche die Sonnenwärme fast ausschließlich maßgebend. Sie ist nicht nur die Ursache, dass auf der Erdoberfläche überhaupt eine Temperatur herrscht, welche das vegetative Leben ermöglicht, sondern es sind sogar auch alle in den verschiedenen Zonen auftretenden Temperaturschwankungen in erster Linie auf ihren Einfluss zurückzuführen. Trotzdem hört deren Wirkung bereits in einer Tiefe von etwa 30 m unter der Erdoberfläche vollständig auf, und von hier angefangen macht sich bereits die zweite kosmische Wärmequelle, nämlich die Erdwärme, geltend. Die Zunahme derselben beträgt etwa 1^0 C für je 33 m, und daher muss in einer Tiefe von 100 km bereits eine Temperatur von wenigstens 3000^0 C herrschen, die also auf der Oberfläche der Erde hinreichen würde, um auch die am schwersten schmelzbaren Körper zu verflüchtigen. Auch die im feuerflüssigen Zustande aus den Vulkanen geschleuderten Lavamassen beweisen die hohe Temperatur des Erdinnern.

Wenn auf eine chemische Verbindung zweier Körper A und B ein dritter Körper C so einwirkt, dass er den einen derselben aus der Verbindung verdrängt, so findet bei einem solchen Processe immer auch ein Wärmeumsatz statt; es wird dabei entweder Wärme verbraucht oder Wärme abgegeben. So wird beim Verbrennen eines Kilogrammes Holz, wenn sich also der Sauerstoff der Luft mit den brennbaren Bestandtheilen des Holzes chemisch verbindet, eine Wärme von ungefähr 3000 Calorien frei. Bei hinreichendem Luftzutritt entwickelt 1 kg Kohle gegen 8000, und 1 kg Petroleum etwa 12000 Calorien.

Ähnliche chemische Vorgänge, die mit dem Lebensprocesse im Menschen und in den Thieren in einem inneren Zusammenhange stehen, führen dem gesunden Körper fortwährend soviel Wärme zu, dass derselbe eine auffallend constante Temperatur — beim Menschen 37·5⁰ C — beibehält, und fast jede Störung der Lebensfunctionen macht sich zuerst durch eine gesteigerte oder verminderte Wärmeentwicklung und eine damit zusammenhängende Temperaturveränderung des Blutes bemerkbar.

Von den physikalischen Wärmequellen haben wir die Wärmeerzeugung durch mechanische Reibung bereits kennen gelernt. Bei Anwendung des Prony'schen Zaumes verwenden wir sie sogar, um durch Verwandlung der mechanischen Energie in Wärme erstere zu messen, und Joule hat diesen Umsatz dazu benützt, um das mechanische Äquivalent der Wärme zu finden. Auch die Verdichtung der Gase ist eine mechanische Wärmequelle, und jeder Stoß zwischen festen Körpern ist von einer Erwärmung derselben an der betreffenden Stelle begleitet.

Eine andere sehr wichtige physikalische Wärmequelle werden wir in den elektrischen Strömen kennen lernen.

---o---

Chemie.

Bei allen bisher betrachteten mechanischen und thermischen Vorgängen wirken die verschiedenen Körper nur insoferne aufeinander ein, dass sie gegenseitig ihre Bewegung beschleunigen oder verzögern, dass ihre Gestalt wechselt, ihr Volumen zu- oder abnimmt, Druck und Temperatur geändert wird oder endlich ein neuer Aggregatzustand auftritt. Unter denselben mechanischen und thermischen Verhältnissen kehrt aber jeder Körper zu den ursprünglichen Erscheinungsformen zurück und zeigt auch dieselben physikalischen Eigenschaften.

Es gibt nun noch eine Menge von Vorgängen, bei welchen die Körper ihr physikalisches Verhalten so sehr ändern, dass wir sie schließlich als neugebildete Körper betrachten müssen. Wenn man z. B. 7 g feinzertheiltes Eisen (Limatura ferri) und 4 g Schwefelblumen mechanisch mischt, so bleibt das Eisen noch immer stark magnetisch, und auch die Schwefeltheilchen lassen sich mit dem Mikroskope noch als solche an Gestalt und Farbe erkennen; wenn man aber diese Mischung in einer Probette soweit erhitzt, bis sie zu glühen beginnt, so sehen wir zunächst, wie sich diese Glut von selbst allmälig über die ganze Masse verbreitet, und wenn endlich dieselbe erloschen ist, so haben wir einen Körper vor uns, den wir weder als Eisen, noch als Schwefel bezeichnen können; wir vermögen weder mit einem Magneten einzelne Eisentheilchen herauszunehmen, noch dieselben unter dem Mikroskope vom Schwefel zu unterscheiden. Es ist also inzwischen nicht nur eine mechanische oder thermische, sondern eine chemische Veränderung vor sich gegangen, und wir sagen, es habe sich aus Eisen und Schwefel Schwefeleisen gebildet. Während sich dabei die physikalischen Eigenschaften der Bestandtheile wesentlich geändert haben, ist aber doch noch ein Factor unverändert erhalten geblieben, nämlich die „Masse“.

Die Annahme, dass wie bei allen mechanischen und thermischen, so auch bei allen chemischen Processen die Masse weder vermehrt noch vermindert werde, also die Aufstellung des Grundsatzes von der Erhaltung der Masse bildete nun den Wendepunkt in der Entwicklung der wissenschaftlichen Chemie; er ist nicht nur in praktischer, sondern noch mehr in theoretischer Hinsicht der kostbarste Prüfstein für die Richtigkeit der vorgenommenen Untersuchungen.

Mit den Gesetzen, nach denen die chemischen Processe überhaupt verlaufen, befasst sich die allgemeine Chemie, und die specielle Chemie wendet dieselben zur Erforschung der chemischen Eigenschaften aller auf natürlichem oder künstlichem Wege entstandenen Körper an.

Allgemeine Chemie.

Emulsion und Lösung. Mischen wir x g Alkohol mit y g Wasser, so erhalten wir $x + y$ g einer Mischung, die zufolge der Proportion $p:100 = x:(x+y)$ aus $p = \frac{x}{x+y} \cdot 100\,\%$ Alkohol und $q = \frac{y}{x+y} \cdot 100\,\%$ Wasser besteht. Solche Mischungen lassen sich mit jedem beliebigen Verhältnisse der Bestandtheile herstellen, wobei immer das Gewicht der Mischung gleich ist der Summe der Gewichte der Bestandtheile, während das Volumen etwas kleiner wird.

Das Öl schwimmt auf dem Wasser, ohne sich mit demselben zu mischen. Wenn wir aber beide Flüssigkeiten stark durcheinander schütteln, so kann das Öl so fein vertheilt werden, dass man mit dem freien Auge zusammenhängende Ölmassen nicht mehr wahrzunehmen vermag, aber langsam sammeln sich doch wieder die Ölmassen an der Oberfläche, ohne sich mit dem Wasser vereinigt zu haben. Wir haben also nur eine sogenannte „Emulsion“ von Öl in Wasser erhalten, während man die Vereinigung des Alkohols mit dem Wasser als „Lösung“ bezeichnet.

Geben wir 36 g Kochsalz in 100 g Wasser, so „löst“ sich das Salz vollkommen auf; setzen wir der „Lösung“ noch mehr Salz zu, so bleibt dieses ungelöst. Die Lösung war also „gesättigt“. So lange der Sättigungspunkt nicht erreicht ist, bezeichnet man die Lösung als „verdünnt“. Es gibt also bei gewöhnlicher Temperatur keine Kochsalzlösung, die mehr als $36\,\%$ Kochsalz enthielte, während wir Lösungen von Wasser mit Alkohol in ganz beliebigen Verhältnissen herstellen können. Aber nicht nur feste und flüssige, sondern auch Gase „gehen in Lösung“, und dann sagt man auch, sie werden von der lösenden Flüssigkeit „absorbiert“. In einer Volumseinheit Wasser lösen sich z. B. 727 Volumseinheiten Ammoniakgas.

In allen diesen Fällen ist die gegenseitige Durchdringung des Lösungsmittels und des gelösten Körpers eine so vollständige, dass auch in den kleinsten Gebieten beide Bestandtheile im gleichen Verhältnisse auftreten. Dabei ändern sich die physikalischen Eigenschaften oft sehr wesentlich. Der Gefrierpunkt der Salzlösung ist ein tieferer als der des Wassers geworden, ihr Siedepunkt ein höherer; auch die specifische Wärme der Lösung ist eine andere.

Diffussion und Osmose. Legen wir auf das in einem Glase enthaltene Wasser ein Stück Papier und gießen dann gefärbten Alkohol darauf, so fließt er horizontal über das Wasser hin, ohne sich sofort mit demselben zu mischen, da er ja ein geringeres specifisches Gewicht hat. Nach längerer Zeit beobachten wir aber, wie das Wasser trotz seiner größeren Dichte in das Gebiet des Alkohols hinauf steigt und dieser trotz des geringeren specifischen Gewichtes in das Wasser hinabsinkt. Dieses den Gesetzen der Hydrostatik widerstrebende Hinüberfließen über die Gleichgewichtsgrenze bezeichnet man als Diffusion. Auch diese Erscheinung hängt in erster Linie von der chemischen Beschaffenheit ab und ist eine Folge der Löslichkeit.

Verschließen wir eine unten trichterförmig sich erweiternde Röhre mit einer thierischen Membrane und senken wir sie dann, mit Kupfervitriollösung gefüllt, in ein Gefäß mit reinem Wasser, bis sich die Flüssigkeiten das Gleichgewicht halten, so nimmt die Kupfervitriollösung unter gleichzeitiger Verdünnung zu, während das Wasser im äußeren Gefäße abnimmt. Es ist also trotz des hydrostatischen Gegendruckes Wasser durch die Membrane in die Lösung eingedrungen.

Noch bestimmter tritt uns diese Erscheinung entgegen, wenn man eine poröse Thonzelle zuerst in eine Lösung von gelbem Blutlaugensalz gibt und dann in eine Kupfervitriollösung taucht. Die an den Wänden der Zelle sich

niederschlagende Schichte von Ferrocyankupfer hat die Eigenschaft, dass sie wohl für Wasser, nicht aber für den in einer Lösung enthaltenen Zucker durchlässig ist. Eine solche Membrane bezeichnet man als semipermeabel, das Durchdringen derselben durch eine Flüssigkeit heißt Osmose und die Kraft, welche die eindringende Flüssigkeit pro cm^2 auszuüben vermag, bezeichnet man als den osmotischen Druck. Die Größe desselben kann man aus der Höhe der Flüssigkeitssäule berechnen, um welche die im Gefäße befindliche Lösung die Flüssigkeit außerhalb desselben überragt. Haben zwei mit Hilfe desselben Lösungsmittels hergestellte Lösungen verschiedener Körper denselben osmotischen Druck, so nennt man sie isotonisch.

Das Moleculargewicht.

Wir haben schon bei der Behandlung der Elasticität von Molecularkräften gesprochen und sie als Kräfte hingestellt, die auch den denkbar kleinsten Theilchen eines Körpers zukommen. Auch andere physikalische Eigenschaften behalten die Körper selbst bei der weitgehendsten Theilung bei und es frägt sich nun, in welchen Massenverhältnissen treten diese kleinsten Theilchen auf, welche dieselben Eigenschaften haben, wie der ganze Körper.

Der italienische Physiker Graf Amadeo Avogadro di Quaregna hat im Jahre 1811 im „Journal de Physique" eine Abhandlung veröffentlicht, in welcher er die folgenden Sätze aufstellt: 1) Jeder Körper besteht aus einer bestimmten Anzahl von Moleculen, welche kleinste Atomgruppen darstellen. 2) Alle Gase enthalten beim gleichen Druck und bei derselben Temperatur in einem gleich großen Volumen die gleiche Anzahl von Moleculen.

Die Formulierung des letzteren Satzes, der als „Hypothese von Avogadro" einen Fundamentalsatz der physikalischen Chemie bildet, beruht auf folgendem Schlusse: Gleiche Vielfache der kleinsten Theile, aus denen die Gase bestehen, haben dasselbe Gewichtsverhältnis, wie diese selbst. Gleiche Volumina zeigen beim gleichen Druck und bei derselben Temperatur die nämlichen Gewichtsverhältnisse, wie sie in der Chemie den Moleculen der Verbindungen zugeschrieben werden; also stellen gleiche Volumina von Gasen gleiche Vielfache von molecularen Massen dar.

Um also die molecularen Massen zweier Körper miteinander zu vergleichen, brauchen wir nur das Gewichtsverhältnis gleicher Volumina der in den gasförmigen Zustand übergeführten Körper bei gleichen Druck- und Temperaturverhältnissen festzustellen. Die Bestimmung des Moleculargewichts fällt also mit der Dampfdichtebestimmung zusammen, wo letztere überhaupt durchführbar ist.

In der Physik pflegt man die Dichte der Gase auf die Dichte der Luft bei 0° C und 76 cm Barometerstand als Einheit zu beziehen; in der Chemie vergleicht man dagegen die Dampfdichten mit der Dichte des Wasserstoffgases, die aber gleich 2 gesetzt wird. Da nun die Dichte der Luft 14·45 mal größer ist, als die des Wasserstoffgases, so müssen wir die auf die Luft bezogenen Dichten mit 28·9 multiplicieren, um das Moleculargewicht zu erhalten; so ergibt sich aus der Dichte des Wasserdampfes von 0·622 dessen Moleculargewicht 18.

Zu denselben Verhältniszahlen gelangen wir auch durch Untersuchung der verdünnten Lösungen eines Körpers. Löst man z. B. nacheinander 1, 2 und 4 g Zucker in 100 g Wasser, so stellt sich ein osmotischer Druck von beziehungsweise 53·5, 101·6 und 208·2 cm Quecksilber ein. Da nun auf dieselbe Wassermenge zuerst die einfache, dann die doppelte und schließlich die vierfache Zuckermenge entfällt, so ist

also der osmotische Druck der Dichte des gelösten Zuckers in der Lösung proportional, wie nach dem Mariotte'schen Gesetze auch der Druck der Dichte eines Gases proportional ist. Der osmotische Druck ist überdies von der Temperatur abhängig, und zwar ist er für eine 1⁰/₀ige Zuckerlösung in cm Quecksilber ausgedrückt, gleich

$$49{\cdot}3\left(1+\frac{t}{273}\right)=\frac{49{\cdot}3}{273}\,(273+t)=0{\cdot}18\,.\,T,$$

wo t die vom Gefrierpunkte des Wassers und T die vom absoluten Nullpunkte an gemessene Temperatur bedeutet. Der in Lösung befindliche Körper folgt also sogar dem Mariotte-Gay-Lussac'schen Gesetze, und daher können wir seine Dichte im Lösungsmittel wie die Dampfdichte zur Bestimmung des Moleculargewichtes benützen. Wir haben früher Lösungen desselben Lösungsmittels als isotonisch bezeichnet, wenn sie denselben osmotischen Druck besitzen; jetzt können wir sagen, Lösungen sind isotonisch, wenn die Menge des gelösten Körpers derselben Dampfdichte, also auch demselben Moleculargewichte entspricht.

In ähnlicher Weise hängt auch die Gefrierpunkterniedrigung und Siedepunkterhöhung vom Gehalte der Lösung ab. Damit bei demselben Lösungsmittel die Gefrierpunkterniedrigung oder Siedepunkterhöhung dieselbe sei, müssen die Mengen des gelösten Körpers im Verhältnisse der Moleculargewichte stehen. Sogar optische Eigenschaften hängen in der Weise vom Moleculargewichte ab, dass nur dann gleiche Wirkungen erzielt werden, wenn sie von Massen ausgehen, die zueinander im Verhältnisse der Moleculargewichte stehen.

Wir gelangen also zum Schlusse, dass verschiedene Körper wenigstens in verdünnten Lösungen und im gasförmigen Zustande dieselbe physikalische Wirkung hervorbringen, wenn sie in ganz bestimmten Massenverhältnissen auftreten, und die kleinsten in diesem Massenverhältnisse auftretenden Theile eines Körpers nennen wir Molecüle, und ihr auf Wasserstoff bezogenes Massenverhältnis heißt Moleculargewicht.

Das Atomgewicht.

Leiten wir einen elektrischen Strom durch angesäuertes Wasser, so scheidet sich an der Elektrode, durch welche der Strom in das Wasser eintritt, an der sogenannten Anode, Sauerstoff aus, und dort, wo der Strom das Wasser verlässt, also an der Kathode, Wasserstoffgas. Fassen wir beide Gase in getrennten Röhren auf, so bemerken wir, dass das Volumen des entwickelten Wasserstoffes ungefähr doppelt so groß ist als das des Sauerstoffes. Die Zahl der ausgeschiedenen Wasserstoffmolecüle muss also nach der Hypothese von Avogadro doppelt so groß sein als die der Sauerstoffmolecüle.

Da auf die Luft bezogen die Dichte des Wasserstoffes 0·0692, die des Sauerstoffes 1·1054 und die des Wasserdampfes 0·622 ist, so haben zwei Volumina Wasserstoff und ein Volumen Sauerstoff zusammen dasselbe Gewicht, wie 1·244 Raum-Einheiten Luft, und wie zwei Volumina Wasserdampf. Letztere enthalten daher ebensoviele Molecüle Wasserdampf, als wir durch die Elektrolyse Wasserstoffmolecüle gewonnen haben; aber erst auf je zwei derselben entfällt ein Molecül Sauerstoff. Jedes derselben muss sich also in zwei gleiche Theile spalten, um in jedem der Wasserdampfmolecüle vertreten zu sein. Diese Theilung der Sauerstoffmolecüle tritt nun ein, wenn man das aus Wasserstoff und Sauerstoff bestehende, stark explosible Knallgas durch einen elektrischen Funken entzündet.

Daraus ersehen wir, dass in das Molecül einer chemischen Verbindung auch kleinere Mengen eintreten können, als die Molecüle, die wir durch Ver-

gasung herzustellen vermögen. Diese nur mehr in den einzelnen Molecüle einer chemischen Verbindung auftretenden Mengen bezeichnet man, da sie auf chemischem Wege nicht weiter theilbar sind, als Atome.

Fangen wir in einer Röhre unter Quecksilber je ein Volumen von Wasserstoffgas und Chlor auf, so nehmen sie zusammen im Dunkeln zwei Volumina ein und vereinigen sich im diffusen Tageslichte langsam, im directen Sonnenlichte aber unter Explosion, zu dem beide Volumina erfüllenden Chlorwasserstoffgas. Letzteres enthält also doppelt soviele Molecüle als früher im Wasserstoff allein oder im Chlor allein vorhanden waren. Es muss also sowohl jedes Wasserstoff-, wie auch jedes Chlormolecül in zwei Atome getheilt worden sein, und je ein Wasserstoffatom und ein Chloratom vereinigen sich zu einem Chlorwasserstoffmolecül. Die auf Luft bezogene Dichte der beiden Bestandtheile ist 0·0692 für Wasserstoff, 2·45 für Chlor und beträgt beim Chlorwasserstoff 1·26; wenn wir diese Werte mit 14·45 multiplicieren, so wäre damit die Masse des Wasserstoffmolecüls gleich 1 gesetzt und wir müssten dem Wasserstoffatom die Masse $^1/_2$ zuschreiben. Es ist also zweckmäßiger die Masse des Wasserstoffmolecüls gleich 2 zu setzen, so dass die des Atoms gleich 1 erscheint. Da aber die Dichte des ebenfalls in zwei Atome zerfallenden Chlors 35·5 mal größer ist als die des Wasserstoffes, so schreiben wir auch dem Chloratom das Gewicht 35·5 zu und bezeichnen diesen Wert als das Atomgewicht des Chlors und $35·5 + 1 = 36·5$ als das Moleculargewicht des Chlorwasserstoffes. Das Moleculargewicht der Verbindung ist also die Summe der Atomgewichte der chemischen Bestandtheile.

Aus der Dichte des Wasserdampfes ergibt sich das Moleculargewicht des Wassers gleich 18; die Dichte des Sauerstoffes ist aber 16 mal größer als die des Wasserstoffes; da die Molecüle beider Elemente aus je zwei Atomen bestehen, so ist auch das Atomgewicht des Sauerstoffes 16, und es müssen sich also zwei Atome Wasserstoff mit einem Atom Sauerstoff verbinden, damit die Summe ihrer Gewichte $2 + 16 = 18$.

Wie wir bei den angeführten Beispielen gezwungen waren, für jedes Wasserstoff-, Sauerstoff- und Chlormolecül eine Spaltung in je zwei Atome anzunehmen, so ergibt sich auch für die Molecüle der meisten übrigen Stoffe eine derartige Theilbarkeit, nur bei Quecksilber, Cadmium und Zink ist noch kein chemischer Process bekannt, bei dem das Molecül eine Theilung erfahren würde, und daher ist in diesen Fällen das Molecül zugleich Atom.

Andererseits gibt es Phosphor- und Arsenverbindungen, in welchen auch der vierte Theil eines Molecüls auftritt, weshalb man dasselbe als vieratomig bezeichnet.

Für Arsen nimmt übrigens die Moleculargröße bei höheren Temperaturen ab, und es enthält dann nicht mehr so viele Atome, weshalb wir annehmen müssen, dass ein Zerfall des Molecüls eingetreten ist. Ein ähnlicher Zerfall der Molecüle stellt sich unter hohen Temperaturen auch bei den meisten chemischen Verbindungen ein, und diese Erscheinung bezeichnet man als Dissociation.

Eine ähnliche zersetzende Wirkung wie die Wärme hat auch der elektrische Strom. Dass die Molecüle nicht die kleinsten Theile sind, in die ein Körper zerlegt werden kann, ergibt sich noch aus einem Gesetze, welches die französischen Physiker Dulong und Petit im Jahre 1819

entdeckten. Wenn man nämlich die Atomgewichte der einfachen Körper mit ihrer specifischen Wärme multipliciert, also gewissermaßen den Wasserwert der Atome berechnet, so beläuft sich dieser Betrag bei den meisten auf etwa 6·4, oder er nähert sich wenigstens bei höheren Temperaturen immer mehr diesem Werte.

So ist z. B. die specifische Wärme des Quecksilbers 0·032, und daher ergibt sich aus der Division 6·4 : 0·032 = 200 dieser Wert als sein Atomgewicht. Da also für die meisten Elemente das Product aus dem Atomgewichte und der specifischen Wärme denselben Wert hat, den man als ihre Atomwärme bezeichnet, so kann man die Atome auch als solche Mengen der verschiedenen Elemente auffassen, die bei gleicher Temperaturerhöhung gleiche Wärmemengen aufnehmen.

Zum gleichen Werte gelangen wir beim Quecksilber, wenn wir sein Gewichtsverhältnis zu den anderen Bestandtheilen einer chemischen Verbindung berechnen. 216 g rothes Quecksilberoxyd zerfällt durch Erwärmen in 16 g Sauerstoff und 200 g Quecksilber. Da 16 g Sauerstoff ebensoviele Atome enthalten wie 1 g Wasserstoff, so werden also auch 200 g Quecksilber auf 1 g Wasserstoff entfallen, und daher wird das Gewicht eines solchen Atomes 200 mal so groß als das des Wasserstoffes sein. Endlich ist auch die Dampfdichte des einatomigen Quecksilbers, nämlich 6·976 etwa 100 mal größer, als die Dichte des zweiatomigen Wasserstoffes 0·0692, und daher ein Atom Quecksilber 200 mal schwerer als ein Atom des Wasserstoffes.

Die chemischen Elemente.

Nachdem die Versuche der Alchemisten, aus unedlen Metallen Gold zu machen, gescheitert waren, wendete sich der erwachende Forschergeist dem Studium des Verbrennungsprocesses zu. Dabei stellte sich heraus, dass derselbe keineswegs als eine Zersetzung des Körpers aufzufassen sei, bei welcher vom Körper die Feuerluft oder das „Phlogiston" ausgeschieden wird. Diese Ansicht war aber so tief eingewurzelt, dass sich selbst hervorragende Forscher wie Cavendish, Scheele uud Priestley trotz schlagender Gegenbeweise zeitlebens nicht von derselben loszusagen vermochten.

In einer Akademieschrift vom Jahre 1772 spricht nun Lavoisier das erste Mal die Ansicht aus, dass die Verbrennung als eine Verbindung aufgefasst werden müsse, weil sie mit einer Gewichtsvermehrung verbunden sei. Priestley und Scheele entdeckten sogar im Jahre 1774 den Sauerstoff, ohne sich dadurch von der alten Ansicht abbringen zu lassen. Lavoisier bezeichnete dagegen den Sauerstoff als den Erzeuger der Sauerstoffverbindungen mit dem Namen „Oxygen" und verhalf der neuen Ansicht zum Siege. Seitdem war das Bestreben der Chemiker immer darauf gerichtet, die Verbindungen als solche zu erkennen und zu zerlegen, von den nicht mehr zerlegbaren Stoffen, den chemischen „Elementen", ein vollständiges und genaues Verzeichnis anzulegen und die Elemente in ein System zu bringen.

Die bis jetzt als solche erkannten chemischen Elemente oder Grundstoffe treten an der Erdoberfläche in sehr verschiedenen Mengen auf. Fast die Hälfte nimmt der Sauerstoff ein; Silicium, Aluminium, Eisen, Calcium, Magnesium, Natrium, Kalium und Wasserstoff umfassen mit jenem allein schon 99%. Die Zahl aller auf der Erde bisher als unzerlegbar erkannten

Stoffe beläuft sich derzeit auf die in der folgenden Tabelle angeführten 76 Elemente.

Aluminium	*Al*	27·1	Kalium . .	*K*	39·15	Scandium .	*Sc*	44·1
Antimon . .	*Sb*	120	Kobalt . . .	*Co*	59·0	Schwefel .	*S*	32·06
Argon . . .	*A*	39·9	Kohlenstoff	*C*	12·00	Selen . . .	*Se*	79·1
Arsen . . .	*As*	75·0	Krypton . .	*Kr*	81·8	Silber . . .	*Ag*	107·93
Baryum . .	*Ba*	137·4	Kupfer . . .	*Cu*	63·6	Silicium . .	*Si*	28·4
Beryllium .	*Be*	9·1	Lanthan . .	*La*	138	Stickstoff .	*N*	14·04
Blei	*Pb*	206·9	Lithium . .	*Li*	7·03	Strontium .	*Sr*	87·6
Bor	*B*	11	Magnesium	*Mg*	24·36	Tantal . . .	*Ta*	183
Brom . . .	*Br*	79·96	Mangan . .	*Mn*	55·0	Tellur . . .	*Te*	127
Cadmium .	*Cd*	112·4	Molybdän .	*Mo*	96·0	Thallium .	*Tl*	204·1
Caesium . .	*Cs*	133	Natrium . .	*Na*	23·05	Thorium . .	*Th*	232·5
Calcium . .	*Ca*	40	Neodym . .	*Nd*	143·6	Thulium .	*Tu*	171
Cerium . .	*Ce*	140	Neon	*Ne*	20	Titan . . .	*Ti*	48·1
Chlor . . .	*Cl*	35·45	Nickel . . .	*Ni*	58·7	Uran	*U*	239·5
Chrom . . .	*Cr*	52·1	Niobium . .	*Nb*	94	Vanadin . .	*V*	51·2
Eisen . . .	*Fe*	56·0	Osmium . .	*Os*	191	**Wasserstoff**	*H*	**1·01**
Erbium . .	*Er*	166	Palladium .	*Pd*	106	Wismuth .	*Bi*	208·5
Fluor . . .	*F*	19	Phosphor .	*P*	31·0	Wolfram .	*W*	184
Gadolinium	*Gd*	156	Platin . . .	*Pt*	194·8	Xenon . . .	*X*	128
Gallium . .	*Ga*	70	Praseodym	*Pr*	140·5	Ytterbium .	*Yb*	173
Germanium	*Ge*	72	Quecksilber	*Hg*	200·3	Yttrium . .	*Y*	89
Gold	*Au*	197·2	Rhodium .	*Rh*	103·0	Zink	*Zn*	65·4
Helium . .	*He*	4	Rubidium .	*Rb*	85·4	Zinn	*Sn*	118·5
Indium . .	*In*	114	Ruthenium	*Ru*	101·7	Zirconium .	*Zr*	90·7
Iridium . .	*Ir*	193·0	Samarium .	*Sa*	150			
Jod	*J*	126·85	**Sauerstoff**	*O*	**16·00**			

Die chemischen Verbindungen.

Der Aufbau der Molecüle aus Atomen lässt sich durch folgende Gesetze charakterisieren:

1. Das Gesetz der constanten Zusammensetzung. Chlorsilber enthält immer 24·74% Chlor und 75·26% Silber; es entfallen daher stets auf 35·45 g Chlor $\frac{35·45}{24·74} . 75·26 = 107·9$ g Silber. Jodsilber besteht immer aus 54·04% Jod und 45·96% Silber, und es entfallen auf 126·8 g Jod $\frac{126·8}{54·04} . 45·96 = 107·9$ g Silber. Dem Atomgewichte des Chlor und Jod entspricht also in diesen chemischen Verbindungen das Atomgewicht des Silbers.

2. Das Gesetz der constanten Verbindungsgewichte. Mit 107·9 g Silber verbinden sich nicht nur 35·45 g Chlor zu Chlorsilber und 126·8 g Jod zu Jodsilber, sondern es verbinden sich auch 35·45 g Chlor mit 126·8 g Jod zu 35·45 + 126·8 = 162·3 g Chlorjod. Letzteres besteht aus 21·84% Chlor und 78·16% Jod und es ist $21·84 = \frac{35·45}{162·3} . 100$ und $78·16 = \frac{126·8}{162·3} . 100$. In denselben Massenverhältnissen, in welchen sich zwei Elemente mit einem dritten zu einer chemischen Verbindung vereinigen, verbinden sich auch untereinander.

3. Das Gesetz der multiplen Proportionen. Nebst dem Chlorjod gibt es noch eine Verbindung dieser beiden Elemente nämlich das aus 45·6% Chlor und 54·4% Jod bestehende Jodtrichlorid, in welchem auf 126·8 g Jod $\frac{45·6}{54·4} . 126·8 = 106·3 = 3 . 35·45$ g Chlor entfallen. Bestehen

zwischen zwei Elementen mehrere chemische Verbindungen, so stellen die auf gleiche Mengen des einen Bestandtheiles entfallenden Mengen des anderen ein Vielfaches derselben dar.

In den Molecülen der chemischen Verbindungen können also nebst den einfachen Atomgewichten auch verschiedene Vielfache derselben auftreten. Um in möglichst einfacher Weise die Zusammensetzung eines Molecüles aus seinen Atomen in einer Formel zum Ausdruck zu bringen, hat man für die verschiedenen Elemente die in der Atomgewichtstabelle angegebenen Bezeichnungen eingeführt, die aber nicht nur das Element als solches bedeuten, sondern zugleich angeben, welche Menge dieses Elementes jedesmal in eine chemische Verbindung eingetreten ist, so oft dieses Zeichen in der Formel auftritt. In jedem Molecüle Wasser kommen zwei Atome Wasserstoff und ein Atom Sauerstoff vor, und daher lautet die chemische Formel $H_2 O$, wobei der Index bei H die Zahl der Wasserstoffatome angibt. Daraus ergibt sich auch, dass das Moleculargewicht des Wassers $2 . 1 + 16 = 18$ ist, und dass mithin auf 100 Gewichtstheile Wasser $\frac{2}{18} . 100 = 11{\cdot}1$ Gewichtstheile Wasserstoff und $\frac{16}{18} . 100 = 88{\cdot}9$ Gewichtstheile Sauerstoff entfallen. Diejenige Menge einer chemischen Verbindung, deren in g ausgedrücktes Gewicht gerade das Moleculargewicht darstellt, bezeichnet man als ein Gramm-Molecül oder Mol.

Um die Zersetzung einer Verbindung in ihre Bestandtheile anzudeuten, stellt man die Formel der unzersetzten Verbindung als Summe der Formeln der neuaufgetretenen Bestandtheile dar. $K Cl O_3 = K Cl + 3 . O$ besagt also, dass ein Mol chlorsaures Kalium $K Cl O_3$ in ein Mol Kaliumchlorid $K Cl$ und Sauerstoff zerfällt. Wir erfahren zugleich aus dieser chemischen Gleichung, dass wir aus $39{\cdot}15 + 35{\cdot}45 + 3 . 16 = 122{\cdot}6$ g chlorsaurem Kalium $39{\cdot}15 + 35{\cdot}45 = 74{\cdot}5$ g Kaliumchlorid erhalten und $3 . 16 = 48$ g Sauerstoff gewinnen können, die bei 0^0 C und 76 cm Barometerstand so viel Raum einnehmen wie 3 g Wasserstoff; da 1 l Luft 1·293 g, also 1 l Wasserstoff $1{\cdot}293 : 14{\cdot}45 = 0{\cdot}0895$ g wiegt, so nehmen auch die 48 g Sauerstoff $3 : 0{\cdot}0895 = 35{\cdot}8$ l Raum ein.

Diese Zersetzung des chlorsauren Kaliums kann durch Erwärmung herbeigeführt werden, und es ist eine bestimmte Anzahl von Calorien nöthig, um diese 122·6 g chlorsaures Kalium, also ein Mol vollständig zu zersetzen. Mit der Untersuchung des Wärmeumsatzes, welcher bei den chemischen Processen auftritt, befasst sich die Thermochemie.

Valenz und Affinität.

Wir haben bisher zwei Wasserstoffverbindungen kennen gelernt, nämlich das Wasser, dessen Zusammensetzung der Formel $H_2 O$ entspricht, und das Salzsäuregas oder der Chlorwasserstoff mit der chemischen Formel $H Cl$. Dagegen werden wir uns vergebens bemühen, den Formeln $H O$, $H Cl_2$ oder $H_2 Cl$ entsprechende Verbindung herzustellen. Diese Thatsache, dass also ein Sauerstoffatom zwei Wasserstoffatome „bindet“ und mit denselben eine bis zu hohen Temperaturen gegen den Zerfall geschützte Verbindung eingeht, bezeichnet man mit den Worten: der Sauerstoff besitze zwei Valenzen oder er sei „zweiwertig“. Dagegen bezeichnet man Chlor als „einwertig“, weil ein Atom Chlor schon mit einem Atom, aber auch nur

mit einem Atom Wasserstoff eine „gesättigte", d. h. eine solche Verbindung bildet, die keines weiteren Atomanschlusses bedarf, um „beständig" zu werden. Bei allen chemischen Elementen und deren Verbindungen, die mit Wasserstoff allein eine gesättigte Verbindung eingehen, sind die Wasserstoffatome maßgebend, um die Zahl der Valenzen zu bestimmen.

Bringen wir ein Atom Kalium mit einem Molecül Wasser in Berührung, so bildet sich nach der Gleichung

$$K + H_2 O = KHO + H$$

Kaliumhydroxyd KHO und ein Wasserstoffatom wird frei. In letzterer Verbindung tritt die Atomgruppe HO auf, die eine ungesättigte Verbindung darstellt, da eine Valenz des Sauerstoffatoms noch nicht gebunden ist. Diese Valenz erscheint nun im Kaliumhydroxyd durch ein Kaliumatom gesättigt. Wir bezeichnen darum auch jedes Kaliumatom als einwertig, weil es in einer gesättigten Verbindung — $H_2 O$ — ein einziges Wasserstoffatom zu ersetzen vermag, um wieder eine gesättigte Verbindung herzustellen.

Daraus erklärt sich die erwähnte Erscheinung, dass die Molecüle der meisten Elemente aus zwei Atomen bestehen. Die bei einem chemischen Processe einzeln ausgeschiedenen Wasserstoffatome sättigen sich sofort mit der freien Valenz des benachbarten Wasserstoffatoms und bilden dann mit demselben ein Molecül von Wasserstoffgas. Man darf sich deshalb den Wasserstoff im gasförmigen Zustande nicht so vorstellen, als ob in demselben nicht auch einzelne Wasserstoffatome vorhanden wären. Vielmehr deutet der Umstand, dass der eben sich entwickelnde Wasserstoff — in statu nascendi — chemisch viel wirksamer ist, darauf hin, dass sich die Wasserstoffatome nicht sofort zu Molecülen zusammenfinden und dann die chemische Actionsfähigkeit verlieren. Um nun dieser Erscheinung Rechnung zu tragen, dass einzelne Atome im Allgemeinen nicht vorkommen, schreibt man die obige Gleichung besser in der Weise an: $K_2 + 2 H_2 O = 2 KHO + H_2$, wobei sich die Indices auf die Zahl der Atome im Molecül, die Coefficienten aber auf die in die Reaction eintretenden ganzen Molecüle beziehen.

Wenn man in diesem Sinne die Valenzen der verschiedenen Elemente untersucht, so stellt sich bald heraus, dass dieser Begriff keineswegs einen so constanten Wert darstellt, wie etwa das Moleculargewicht und Atomgewicht. Es kommt öfter vor, dass ein Element, nach seinen Verbindungen mit dem einen Elemente beurtheilt, eine andere Anzahl von Valenzen zeigt als gegenüber einem zweiten Elemente. Dabei handelt es sich meistens um eine Differenz von zwei Valenzen.

Die wichtigsten Elemente, die sich im allgemeinen als

einwertig erweisen, sind: *H, Cl, Br, J, F, K, Na, Li, Rb, Cs, Tl, Ag*;
zweiwertig sind: *O, S, Se, Te, Ca, Sr, Ba, Mg, Zn, Cd, Pb, Cu, Hg*;
dreiwertig: *N, P, As, B, Au*; vierwertig: *C, Si, Al, Pt, Ir, Sn*;
Fe, Ni, Co, Mn, Cr zeigen sich bald zwei-, bald vierwertig, *Sb* und *Bi* bald drei-, bald fünfwertig; *V* zeigt sogar die meisten Wertigkeitsstufen bis zur fünften.

In demselben Sinne, wie wir bisher das Wort Valenzen gebraucht haben, wurde auch das Wort Affinität verwendet; mit diesem Ausdrucke verbindet

man aber jetzt fast ausschließlich einen anderen Begriff. Sauerstoff gibt mit Wasserstoff die gesättigte Verbindung $H_2 O$; bringen wir ein Stück Natrium mit Wasser in Berührung, so wird aus jedem Wassermolecül ein Wasserstoffatom verdrängt und durch ein Natriumatom ersetzt. Diese Kraft des Natriumatoms, ein Wasserstoffatom aus einer gesättigten Verbindung zu verdrängen, schreiben wir nun seiner größeren „Affinität" oder seiner stärkeren Verwandtschaft zu den im Molecül verbleibenden Atomen zu.

Wenn Wasserdampf über glühende Eisenfeilspäne geleitet wird, so bilden sich nach der Gleichung

$$8 H_2 O + 3 Fe_2 = 2 Fe_3 O_4 + 8 H_2$$

aus 8 Wassermolecülen und drei Eisenmolecülen zwei Eisenoxydmolecüle $Fe_3 O_4$ und 8 Wasserstoffmolecüle. Das glühende Eisen entzieht also dem Wasserdampfe den Sauerstoff, und dann werden die freigewordenen Wasserstoffmolecüle von den nachrückenden Wasserdämpfen aus dem Reactionsgebiete verdrängt. Wenn man andererseits Wasserstoff über Eisenoxyd leitet, so erhält man Wasserdampf und metallisches Eisen nach der Gleichung

$$8 H_2 + 2 Fe_3 O_4 = 8 H_2 O + 3 Fe_2.$$

Dieser dem früheren ganz entgegengesetzte Process wäre unmöglich, wenn nicht auch alle hier auftretenden Verbindungen neben einander bestehen könnten. Im letzteren Falle wird aber das Eisenoxyd nur darum vollständig „reduciert", d. h. vom Sauerstoffe befreit, weil es mit immer neuen Wasserstoffatomen in Berührung kommt und die eben gebildeten Wasserdämpfe schnell entweichen, ehe sie das schon reducierte Eisen wieder zu oxydieren vermögen. Aus derartigen Reactionen hat man den Schluss gezogen, dass der chemische Process durch die größere Affinität des neu in die Reaction eintretenden Körpers hervorgerufen und bis zur vollständigen Zersetzung aufrecht erhalten werde. Zur Erklärung dieser Erscheinung reicht aber auch die Annahme hin, dass die in den Process eintretenden Elemente nur insoferne „affin" seien, als sie überhaupt mit einander Verbindungen bilden; gewöhnlich treten in solchen Fällen alle dabei möglichen Verbindungen gleichzeitig auf, wenn keiner der neu ausgeschiedenen Körper im Verlaufe der Reaction entfernt wird und jeder der in Action tretenden Bestandtheile mit seiner ganzen Masse wirksam bleibt; das Endresultat hängt aber auch von der Menge der Bestandtheile ab und die gesetzmäßige Formulierung dieses Einflusses der Masse bezeichnet man als das Massenwirkungsgesetz.

Der entscheidende Wendepunkt für Entwicklung einer streng wissenschaftlichen Chemie war gekommen, als Lavoisier die Wage als jenen Apparat hinstellte, der in kritischen Fällen zu entscheiden habe. Durch sie wurde die phlogistische Ansicht über den Verbrennungsprocess überwunden, und nur mit ihrer Hilfe gelangte man zum ersten Fundamentalsatze der Chemie von der Erhaltung der Masse. Trotz dieser und vieler anderer von allen gebildeten Zeitgenossen anerkannten Verdienste um die Wissenschaft verfiel sein Haupt im Jahre 1794 dem Fallbeile der Revolutionsparteien.

Jer. Ben. Richter zeigte zuerst an der Verbindung der Basen mit den Säuren zu Salzen das Gesetz der constanten Gewichtsverhältnisse. Der Franzose Proust dehnte dieses Gesetz auf die übrigen, damals bekannten Verbindungen aus, und der Engländer Dalton gelangte endlich durch die Untersuchung gasförmiger Verbindungen zum Gesetze der multiplen Proportionen (1807). Der Schwede Berzelius stellte zuerst das allgemeine Gesetz auf über die Zusammensetzung der chemischen Verbindungen, indem er die Verbindungs- und Atomgewichte einführte und dabei auch die Regel Avogadros verwendete. Über den Begriff Affinität kam es zu einem wissenschaftlichen

Streite zwischen Proust und Graf Berthollet; ersterer vertrat die Ansicht, dass die Stärke der Affinität allein für den Ausgang einer Reaction maßgebend sei. Berthollets Ansicht, die sich dem erwähnten Massenwirkungsgesetze näherte, unterlag und wurde erst in neuester Zeit (1869) durch Horstmann, durch den Amerikaner Gibbs und durch van t'Hoff neuerdings nachgewiesen und auch theoretisch erklärt.

Specielle Chemie.

Die in der Atomgewichtstabelle angeführten Elemente pflegt man in zwei Gruppen einzutheilen, in die der Nichtmetalle und die der Metalle. Während erstere sowohl ihrer äußeren Erscheinung nach, wie auch hinsichtlich ihres chemischen Verhaltens sehr verschieden sind, zeichnen sich die Metalle in mannigfacher Hinsicht durch ein einheitliches Gepräge aus; sie sind relativ gute Wärmeleiter und gute Elektricitätsleiter, und viele haben auch ein größeres specifisches Gewicht. Aber alle diese physikalischen Merkmale gestatten ebensowenig wie die chemischen Eigenschaften eine scharfe Charakterisierung der ganzen Gruppe, insbesonders zeigt der den Nichtmetallen beigezählte Wasserstoff in mehrfacher Hinsicht metallische Eigenschaften. Die wichtigsten Nichtmetalle sind: *H, Cl, Br, J, F, O, S, Se, Te, N, P, As, B, Si* und *C*.

Eine hervorragende Rolle unter diesen spielt der Kohlenstoff, da er mit *H, O* und *N* eine unabsehbare Reihe von Molecülen bildet, die sich entweder in der Zusammensetzung oder auch nur in der Gruppierung der Atome unterscheiden. Viele dieser Kohlenstoffverbindungen verdanken ihre Entstehung einem lebenden Organismus, weshalb man die Chemie dieser und ähnlich aufgebauter Kohlenstoffverbindungen als organische Chemie bezeichnet hat.

Die Behandlung der übrigen Elemente und ihrer Verbindungen bildet das Gebiet der anorganischen Chemie.

Trägt man auf einer Geraden von einem linksliegenden Anfangspunkte ausgehend, alle Atomgewichte als Strecken nach rechts auf, so erhält man offenbar ebensoviele Punkte als Elemente. Dieses Punktesystem lässt sich nun in acht Gebiete theilen, deren jedes eine Reihe von Elementen enthält, und immer zeigen die ersten Elemente auf der linken Seite eines solchen Abschnittes ein auffallend ähnliches Verhalten, ebenso die mehr in der Mitte und die rechts liegenden Elemente. Gewisse Eigenschaften kehren also in jedem Abschnitte periodisch wieder. Der Wasserstoff nimmt dabei eine Art Ausnahmsstellung ein. Diese Periodicität der nach dem Atomgewichte geordneten Elemente, welche zuerst der russische Chemiker D. Mendelejeff im Jahre 1869, und bald darauf unabhängig von demselben im Jahre 1870 Lothar Mayer entdeckte, führte zur Aufstellung des natürlichen Systems der Elemente. Wir werden von demselben bei der Beschreibung der einzelnen Elemente nur insoferne abweichen, dass wir die Reihenfolge der Gruppen etwas verschieben, um wichtigere Elemente früher besprechen zu können.

In der folgenden Tabelle enthält jede Zeile eine Periode des Systems, und die untereinander stehenden Elemente bilden je eine verwandte Gruppe. Jede solche „Familie" zerfällt in zwei Theilgruppen *A* und *B* mit etwas verschiedenem Charakter. Die Nummer der Familie gibt für die Mehrzahl der Elemente die Wertigkeit an, oder sie unterscheidet sich von derselben um zwei Einheiten.

I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII
A	*B*	*A*	*B*	*A*	*B*	*A*	*B*	*A*	*B*	*A*	*B*	*A*	*B*	—
Li	—	*Be*	—	*B*	—	*C*	—	—	*N*	—	*O*	—	*F*	—
Na	—	*Mg*	—	*Al*	—	*Si*	—	—	*P*	—	*S*	—	*Cl*	—
K	—	*Ca*	—	*Sc*	—	*Ti*	—	*V*	—	*Cr*	—	*Mn*	—	*Fe, Co, Ni*
—	*Cu*	—	*Zn*	—	*Ga*	—	*Ge*	—	*As*	—	*Se*	—	*Br*	—
Rb	—	*Sr*	—	*Y*	—	*Zr*	—	*Nb*	—	*Mo*	—	—	—	*Ru, Rh, Pd*
—	*Ag*	—	*Cd*	—	*Jn*	—	*Sn*	—	*Sb*	—	*Te*	—	*J*	—
Cs	—	*Ba*	—	*La*	—	*Ce*	—	*Pr*	*Nd*	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	*Yb*	—	—	—	*Ta*	—	*W*	—	—	—	*Os, Jr, Pt*
—	*Au*	—	*Hg*	—	*Pl*	—	*Pb*	—	*Bi*	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	*Th*	—	—	—	*U*	—	—	—	—

W a s s e r s t o f f (Hydrogen). Zur Erzeugung desselben bedient man sich gewöhnlich einer Flasche, durch deren luftdicht verschlossenen Hals zwei Röhren führen; die eine, welche bis auf den Boden reicht, dient dazu, die zur Entwicklung nöthige Schwefelsäure nachzugießen, die andere, kürzere leitet das Gas zum Gasometer oder zur pneumatischen Wanne. In die Flasche gibt man vor dem Verschließen Zinkspäne und Wasser und gießt dann langsam Schwefelsäure nach. Da der zuerst sich entwickelnde Wasserstoff mit dem Sauerstoff der Luft in der Flasche Knallgas bildet, so muss man die Gasentwicklung durch längere Zeit fortsetzen, ehe man gefahrlos mit dem ausgeschiedenen Wasserstoffgas experimentieren kann. Die Entwicklung erfolgt nach der Gleichung: $Zn + H_2SO_4 = ZnSO_4 + H_2$.

Wegen des geringen specifischen Gewichtes kann man den Wasserstoff auch in einem unten offenen Glase auffangen; wenn man so eine Probette mit Wasserstoff füllt und über eine Kerzenflamme hält, so entzündet sich das Gas mit einem schwachen, pfeifenden Knall, da sich bei Berührung mit Luft immer etwas Knallgas bildet. Diese Form der Entzündung ist zugleich ein sehr charakteristisches Kennzeichen für Wasserstoffgas. Taucht man in einen größeren mit Wasserstoff gefüllten Glascylinder von unten eine brennende Kerze, so erlischt die Kerzenflamme, da das Gas das Brennen nicht unterhält, d. h. mit dem Materiale der Kerze keine Verbindung eingeht; wenn man dann die Kerze herauszieht, so entzündet sie sich wieder an der Flamme des an der Begrenzungsfläche mit der Luft brennenden Wasserstoffes.

Außer durch sein geringes specifisches Gewicht zeichnet sich der Wasserstoff auch durch seine selbst das Wasser übertreffende Wärmecapacität, durch sein relativ gutes Wärme- und Elektricitätsleitungsvermögen aus, und er wird auch wie die Metalle bei der Elektrolyse am negativen Pole, also an der Kathode, ausgeschieden. Der Wasserstoff wurde von Cavendish im Jahre 1766 entdeckt.

Elemente der VI. F a m i l i e. Den S a u e r s t o f f gewinnt man nach der Gleichung:

$$2\,HgO = 2\,Hg + O_2$$

durch Erhitzen rothen Quecksilberoxydes in einer Retorte aus Kaliumglas, denn nur dieses verträgt eine hinreichend hohe Temperatur. Schon Priestley, welcher den Sauerstoff im Jahre 1774 entdeckte, stellte ihn auf diesem Wege dar. Zur Erzeugung größerer Mengen eignet sich besser das allerdings explosible, chlorsaure Kalium, aus dem sich der Sauerstoff nach der Gleichung: $2\,KClO_3 = 2\,KCl + 3\,O_2$ entwickelt. Der Zusatz von Braunstein bewirkt, dass die Gasentwicklung schon bei niedrigeren Temperaturen beginnt und weniger gefährlich verläuft.

Der Sauerstoff zeichnet sich durch sein außerordentlich lebhaftes Bestreben aus, fast mit allen übrigen Elementen chemische Verbindungen einzugehen, die dann als O x y d e bezeichnet werden. Schwefel, Kohle, Phosphor und Magnesium verbrennen im Sauerstoff unter viel stärkeren Feuererscheinungen als in der Luft. Selbst bei einer bis zur Rothglut erhitzten Stahlfeder vollzieht sich der Oxydationsprocess unter Feuererscheinungen. Der Oxydationsprocess muss nicht nothwendig unter Lichterscheinungen erfolgen, wohl aber ist er an eine bestimmte Temperatur gebunden. Die Wärmeentwicklung, mit welcher er immer verbunden ist, wird nach der Anzahl Calorien bemessen, die bei der Verbrennung eines Kilogrammes des brennenden Körpers frei werden, und diese Wärme bezeichnet man als V e r b r e n n u n g s w ä r m e. Um den Sauerstoff als solchen zu erkennen, taucht man in das Gas einen glimmenden Holzspan, der sofort hell zu brennen beginnt.

Das Oxydationsvermögen steigert sich noch, wenn man durch Sauerstoff wiederholt den elektrischen Funken schlagen lässt; dabei bildet sich eine Modification des

Sauerstoffes, welche man Ozon nennt; Ozon besteht nach seiner größeren Dichte zu schließen aus dreiatomigen Molecülen. Stellt man die beiden sich gegenseitig bindenden Sauerstoffatome schematisch durch die Bezeichnung $O=O$ dar, so entspricht der gegenseitigen Bindung der Sauerstoffatome im Ozon das Schema $O\!\!<\!\!\frac{O}{O}$ (Dreieck aus O—O—O). Beim gewöhnlichen Sauerstoffatome werden also durch den Zerfall des Molecüls 4 Valenzen frei, beim Ozonmolecül sogar 6.

Wenn man Wasserstoff- und Sauerstoffgas aus zwei getrennten Röhren in der Weise ausströmen lässt, dass sie sich unmittelbar vor der Entzündungsstelle im Verhältnisse von 1 und 2 Raumtheilen mischen, so erhält man die „Knallgasflamme", in der sich beide Gase zu Wasser chemisch vereinigen. Diese Flamme hat eine so hohe Temperatur, dass Eisen und Kupfer, ja selbst Platin sehr rasch geschmolzen werden kann, und auch Quarz wenigstens dickflüssig wird. Von dieser Flamme erhitzt, strahlt der Kalk das „Drummond'sche Licht" aus.

Da der Sauerstoff zweiwertig, der Wasserstoff aber einwertig ist, so kann es keine gesättigte Verbindung von der Form OH geben, da eine Valenz des Sauerstoffatomes ungesättigt ist. Weil aber diese Atomgruppe in größeren Molecülen sehr oft vorkommt und in denselben die Rolle eines einwertigen Atomes spielt, so bezeichnet man sie einfach als die Hydroxylgruppe.

Die wichtigste Verbindung von Wasserstoff und Sauerstoff ist das Wasser. Es vermag viele feste, flüssige und gasförmige Körper zu lösen, und daher enthält das Quell-, Fluss- und Meerwasser meist eine Menge derselben im gelösten Zustande. Da die meisten dieser zufälligen Bestandtheile einen viel höheren oder viel tieferen Siedepunkt haben, so kann man das natürliche Wasser von denselben reinigen, indem man es in einer Retorte zum Sieden bringt und dann die Wasserdämpfe in einer Kühlungsvorlage condensiert. Beim ersteren Processe bleiben die Bestandtheile, welche nicht so leicht in den dampfförmigen Zustand übergehen, in der Retorte zurück, die flüchtigeren Beimengungen werden aber bei der Condensierung des Wasserdampfes von diesem getrennt. Infolgedessen erhält man durch die Destillation nahezu chemisch reines Wasser. Dem destillierten Wasser kommt an Reinheit zunächst das beim „Kreislaufe des Wassers in der Natur" destillierte Regenwasser, das aus der Atmosphäre meist nur etwas Kohlensäure und Ammoniak aufnimmt. Relativ sehr reich an Kohlensäure und auch an gelösten Salzen ist das Quellwasser. Für die „Härte" des Wassers ist der Kalkgehalt maßgebend. Da der Kalkgehalt die Schaumbildung des Seifenwassers verhindert, so verwendet man die Schaumbildung, um die Härte, beziehungsweise den Kalkgehalt des Wassers zu bestimmen. Sehr kohlensäurereiche Quellen bezeichnet man als „Säuerlinge", und solche, die kohlensaures Natron führen, als Sodawasser. Dem künstlichen „Sodawasser" wird der Kohlensäuregehalt unter erhöhtem Drucke beigebracht. Die hierauf bei geringerem Drucke entweichende Kohlensäure ruft dann das „Moussieren" hervor. Das sogenannte Stahlwasser enthält Eisen, die Schwefelquellen führen Schwefelwasserstoff mit sich, Bitterwasser Magnesiumsulfat. Außer den genannten Stoffen kommen in den verschiedenen Mineralwässern oft noch mehrere andere Körper im gelösten Zustande, bald in größeren, bald in geringeren Mengen vor. Das Meerwasser enthält $2{\cdot}7\,\%$ Kochsalz und etwa $0{\cdot}8\,\%$ andere Salze. Von mechanischen Beimengungen, insbesonders von den oft gesundheitsschädlichen Verbindungen, die sich bei der Zersetzung organischer Substanzen bilden, kann man das Wasser durch Filtrierung befreien. Zu diesem Zwecke wird das Wasser durch Sand-, Kohle- oder Thonfilter gepresst.

Der Schwefel verbindet sich wie der Sauerstoff mit den meisten Elementen, besonders mit den Metallen. Die allmählich um sich greifende Glut in einer Mischung von Eisenfeilicht und Schwefelblumen, die dem Verhältnisse der Atomgewichte entspricht, erinnert lebhaft an einen Verbrennungsprocess. Auch Kupfer geht unter Feuererscheinungen im Schwefeldampfe eine chemische Verbindung mit demselben ein. Die Verbindungen des Schwefels mit Metallen bezeichnet man als Sulfide; zu diesen gehören die als Kiese, Blenden und Glanze bezeichneten Erze.

In mehr oder weniger reinem Zustande findet sich der Schwefel in der Nähe von Vulkanen, besonders auf Sicilien, in Island, Japan und in Mexiko.

Den gereinigten Schwefel erhält man dadurch, dass der natürliche Schwefel oder die Schwefelerze „geröstet", das heißt im trockenen Zustande, sehr hohen Temperaturen ausgesetzt und dann die sich entwickelnden Dämpfe in einem benachbarten Raume abgekühlt werden. Wenn dieser Process hinreichend langsam vor sich geht, so sublimiert der Schwefel und schlägt sich sofort im festen Zustande als sogenannte „Schwefel-

blumen“ nieder. Bei rascherer Abkühlung wird so viel Wärme frei, dass dieselbe hinreicht, den sublimierten Schwefel zu schmelzen, und der so gewonnene flüssige Schwefel wird dann in Röhren gegossen und kommt als „Stangenschwefel“ in den Handel.

Mit Wasserstoff bildet er die dem Wasser analoge Verbindung H_2S, den Schwefelwasserstoff, der als Gas gelöst in den Schwefelquellen vorkommt, sich auch in faulenden Eiern entwickelt und daher nach solchen riecht. Im Laboratorium wird er gewonnen, indem man Schwefeleisen FeS mit Salzsäure HCl übergießt. Nach der Gleichung: $FeS + 2HCl = FeCl_2 + H_2S$ erhält man dann Eisenchlorid $FeCl_2$ und Schwefelwasserstoff. Der Schwefelwasserstoff ist sehr wichtig für die chemische Analyse, weil er die Metalle *Au*, *Pt*, *As*, *St*, *Sn*, *Ag*, *Hg*, *Pb*, *Bi*, *Cu* und *Cd* aus sauren Lösungen „fällt“. Wenn man nämlich einer sauren Lösung, die eines dieser Metalle enthält, Schwefelwasserstoff zusetzt, so stellt sich sofort ein Niederschlag ein, aus dessen Beschaffenheit man auf die Anwesenheit eines bestimmten Metalles schließen kann.

Beim Verbrennen verbindet sich der Schwefel mit dem Sauerstoffe der Luft zur Schwefeldioxyd SO_2. Aus der Verbindung H_2S ergibt sich, dass Schwefel wie Sauerstoff zweiwertig ist. Die Verkettung der drei Atome S und $2\,O$ dürfte also dem Schema

$S{<}^{O}_{O}$ entsprechen. Dieses Gas bildet sich auch beim Rösten der Schwefelerze unter

starkem Luftzutritt, oder wenn man Kupferspäne mit Schwefelsäure in einem Glaskolben erwärmt, und zwar nach der Gleichung:

$$4H_2SO_4 + Cu_2 = 2CuSO_4 + 2SO_2 + 4H_2O.$$

Leitet man den so entwickelten Schwefelwasserstoff in eine größere „Wulf'sche Flasche“ und zündet dort das ausströmende Gas an, so entwickelt sich SO_2, und dieses mischt sich nach dem Erlöschen der Flamme mit dem nachströmenden HS_2. Dann scheidet sich aus beiden Gasen nach der Gleichung:

$$2H_2S + SO_2 = 3S + 2H_2O$$

reiner Schwefel ab. Der gleiche Vorgang musste offenbar auch in der Umgebung von Vulkanen auftreten, wenn aus denselben brennender Schwefelwasserstoff hervorströmte.

Diese Verbindung bildet gewissermaßen eine Vorstufe der wichtigsten Schwefelverbindung, nämlich der Schwefelsäure H_2SO_4. Diese wird im Großen dadurch erzeugt, dass man das durch Rösten von Schwefelerzen, besonders des Pyrites, gewonnene Schwefeldioxyd in Bleikammern mit Luft, Wasserdämpfen und Salpetersäure in Berührung bringt. Die Salpetersäure zerfällt leicht in eine ganze Reihe verschieden stark oxydierter Stickstoffverbindungen, welche, die vorhandenen Wasserdämpfe zersetzend, mit Hilfe des Sauerstoffes der Luft das nöthige Material zum Aufbaue der Verbindung H_2SO_4 liefern, ohne selbst dabei aufgezehrt zu werden. Die so entstandene wässerige Säure wird dann in Retorten aus Platin bis zur vollständigen Concentrierung eingedampft. Die concentrierte Schwefelsäure nimmt sehr begierig Wasser auf und wird daher zum Trocknen der Gase verwendet, indem man letztere durch die Schwefelsäure streichen lässt. Die Concentration der Schwefelsäure wird durch Aräometer nach „Graden Beaumè“ gemessen. Wenn man Schwefelsäure verdünnen will, so setzt man dieselbe zuerst in geringen Mengen einer hinreichend großen Wassermenge zu. Organischen Substanzen, die in concentrierte Schwefelsäure gerathen, entzieht diese Sauerstoff und Wasserstoff, wodurch dieselben rasch unter Ausscheidung von Kohlenstoff zerstört werden.

Schon in geringen Mengen zugesetzt, verleiht die Schwefelsäure dem Wasser die Eigenschaft, einen Pflanzenfarbstoff, die Lakmustinctur oder ein damit gefärbtes Papier, welches einen zwischen roth und blau liegenden Farbenton besitzt, entschieden roth zu färben. Von jeder Flüssigkeit, welche ebenfalls diese Eigenschaft zeigt, sagt man, sie „reagiere sauer“, wenn dagegen eine ausgesprochene Blaufärbung eintritt, so sagt man, sie reagiere „alkalisch“. Flüssigkeiten, die weder sauer noch alkalisch reagieren, bezeichnet man als „neutral“, wie es z. B. beim reinen Wasser der Fall ist.

Um Wasserstoff zu erzeugen, haben wir auf Zink Schwefelsäure einwirken lassen, und dann $ZnSO_4$, also Zinkvitriol erhalten, das in Wasser gelöst, eine vollkommen neutrale Flüssigkeit gibt. Diese Verbindung ist aus H_2SO_4 dadurch hervorgegangen, dass die zwei *H*-Atome durch ein einziges Zinkatom ersetzt wurden; man bezeichnet sie daher als Zinksulfat; alle in ähnlicher Weise aus der Schwefelsäure hervorgegangenen Metallverbindungen führen den Namen Sulfate. Das Kupfervitriol $CuSO_4$ bildet also das Kupfersulfat, das Eisenvitriol $FeSO_4$ das Eisensulfat u. s. w. Da die Schwefelsäure zuerst aus Eisenvitriol hergestellt wurde, so sind besonders die unreineren Qualitäten noch unter dem Namen Vitriolöl bekannt. Die Schwefelsäure gehört zu den

in der chemischen Industrie am häufigsten in Anwendung kommenden Säuren und bildet daher einen hervorragenden Industriezweig.

Zwei in chemischer Hinsicht dem Schwefel ähnliche Elemente sind noch Selén und Tellur. Ersteres besitzt die interessante Eigenschaft, dass es in einer gewissen Modification sehr stark sein elektrisches Leitungsvermögen ändert, wenn es dem Lichte ausgesetzt wird. Das ebenfalls in diese Gruppe gehörige Element Chrom findet bei galvanischen Elementen vielfach Verwendung.

Die Atomgewichte dieser Familie 16 (O), 32 (S), 127 (Te) verhalten sich annähernd wie 1 : 2 : 8.

Elemente der V. Familie. Der Stickstoff oder das Nitrogen wurde zuerst von Lavoisier und Scheele als zweiter Hauptbestandtheil der atmospärischen Luft erkannt, nachdem die Bedeutung des Sauerstoffes richtig erfasst worden war. Um ihn darzustellen, gibt man in ein auf dem Wasser schwimmendes Schälchen ein Stückchen Phosphor, entzündet denselben aus größerer Entfernung mit einem heißen Drahte und schließt dann die umgebende Luft durch eine auf das Wasser gesetzte Glasglocke ab. Die vom verbrennenden Phosphor erzeugten Dämpfe werden vom Wasser bald absorbiert, und zugleich steigt das Wasser im Innern der Glasglocke empor, bis es ungefähr $^1/_4$ des Volumens ausfüllt. Schon diese Art seiner Gewinnung ist für das chemische Verhalten des Stickstoffes charakteristisch; er zeichnet sich im Gegensatze zum Sauerstoff durch den Mangel an chemischer Wirksamkeit aus. Der Stickstoff brennt selbst nicht und unterhält auch keinen dem Verbrennen ähnlichen Process, sodass der auf den Sauerstoffgehalt der Luft angewiesene Lebensprocess der Menschen und Thiere in einer Stickstoffatmosphäre rasch erlöschen würde, während so die Wirkung des Sauerstoffes in zweckmäßiger Weise gemildert wird. Daher wurde der Stickstoff auch „Azot“ genannt.

Reine atmosphärische Luft besteht in höheren Schichten dem Gewichte nach aus 79·2% Stickstoff und 20·8% Sauerstoff oder dem Volumen nach aus 77% Stickstoff und 23% Sauerstoff. Dabei ist dem Stickstoff noch ein anderes Element beigezählt worden, welches erst im Jahre 1895 Lord Rayleigh und W. Ramsay vom Stickstoffe trennten und als ein eigenes Element erkannten, das Argon, das nahezu 1% ausmacht und hinsichtlich seiner Reactionsthätigkeit sich noch träger verhält, als der Stickstoff. Trotz der sehr constanten Zusammensetzung ist die Luft nur als ein Gemenge von Sauerstoff und Stickstoff aufzufassen und nicht als eine chemische Verbindung. Beide Bestandtheile der Luft werden vom Wasser absorbiert, der Sauerstoff aber stärker als der Stickstoff, weshalb die vom Wasser absorbierte Luft dem Volumen nach etwa 35% Sauerstoff enthält. Auch die durch den Linde'schen Apparat verflüssigte Luft ist viel sauerstoffreicher, weil sich der Stickstoff viel rascher verflüchtigt als der Sauerstoff. In der Nähe der Erdoberfläche steigert sich nicht nur der Wasserdampf-, Kohlensäure- und Ammoniakgehalt der Luft, sondern sie enthält hier auch viel mehr Staub und Bacterien, besonders in der Nähe größerer Städte. Schon auf dem Lande zählen die Staubtheilchen pro cm^3 nach Tausenden und erreichen in Städten, besonders in Zimmern, die Zahl von mehr als 40 Millionen. Der bis in sehr hohe Regionen sich erstreckende Staubgehalt der Luft ist für die Bildung der atmosphärischen Niederschläge von sehr großer Bedeutung, da der Condensationsvorgang zuerst von den Staubtheilchen ausgeht.

Die Wasserstoffverbindung NH_3, das Ammoniakgas, bildet sich oft auch in der Natur bei der Zersetzung stickstoffhaltiger, organischer Substanzen und ist an seinem, zu Thränen reizenden Geruch leicht erkenntlich. Künstlich stellt man es aus einem Gemenge von Salmiaksalz NH_4Cl und Ätzkalk CaO dar, aus dem sich durch Erwärmung nach der Gleichung:

$$2\,NH_4Cl + CaO = CaCl_2 + H_2O + 2\,NH_3$$

Chlorcalcium $CaCl_2$, Wasser und Ammoniak bilden. Dieses Gas muss unter Quecksilber aufgefangen werden, da es vom Wasser so stark absorbiert wird, dass bei 0° C ein Liter Wasser ungefähr 1000 l Ammoniak in sich aufzunehmen vermag. Die so entstehende wässerige Lösung von Ammoniak kommt als Salmiakgeist in den Handel. Aus demselben kann man dann das Ammoniakgas einfach in der Weise herstellen, dass man ihn erwärmt, wobei das absorbierte Gas wieder entweicht. Auf dieser starken Absorbtionsfähigkeit des Ammoniaks und seiner Eigenschaft, schon bei niederen Temperaturen rasch zu verdampfen, beruht seine Verwendung bei der Eismaschine von Carrè.

Während wir aus der Dichte des Ammoniakgases 0·589 und dem daraus sich ergebenden Moleculargewicht $0·589 . 28·9 = 17 = 3 + 14$ schließen müssen, dass der

Stickstoff dreiwertig sei, spricht die Formel des Salmiaksalzes NH_4Cl dafür, dass er fünfwertig sei. Diese Verbindung bildet sich nach der Gleichung:

$$8\,NH_3 + 3\,Cl_2 = N_2 + 6\,NH_4Cl,$$

wenn Chlorgas auf Ammoniak wirkt, wobei sich auch freier Stickstoff entwickelt.

Man erhält es auch als Nebenproduct bei der Leuchtgasfabrication, da die Steinkohlen bei der trockenen Destillation ihren Stickstoff- und Wasserstoffgehalt als Ammoniak ausscheiden, der mit Salzsäure behandelt, nach der Gleichung:

$$NH_3 + HCl = NH_4Cl$$

das Salmiaksalz liefert, das in der Industrie vielfach Verwendung findet.

Wie wir das ungesättigte „Radical" des Wassers, nämlich HO als Hydroxylgruppe bezeichnet haben, so nennen wir hier die ungesättigte Atomgruppe NH_4 als die einwertige Ammoniumgruppe.

Im Gegensatze zu den Säuren hat Ammoniak die Eigenschaft, geröthetes Lakmuspapier blau zu färben, also „alkalisch" zu reagieren. Die alkalische Reaction des Ammoniaks ist eine sehr starke, da schon geringe Mengen genügen, um kräftig sauer reagierende Flüssigkeiten zu neutralisieren. Es ist daher ein sehr geeignetes Mittel, die zerstörende Wirkung von Säuren zu verhindern.

Die wichtigste Stickstoffsäure ist die Salpetersäure HNO_3. Man gewinnt sie, indem man entweder Kalisalpeter KNO_3 oder Natriumsalpeter mit Schwefelsäure erwärmt; aus letzterem erhält man nach der Gleichung:

$$NaNO_3 + H_2SO_4 = NaHSO_4 + HNO_3.$$

Ist bei diesem Processe Salpeter im Überschusse vorhanden, so entwickelt sich nach der Gleichung:

$$NaNO_3 + NaHSO_4 = Na_2SO_4 + HNO_3,$$

aus dem überschüssigen Salpeter und dem primären Natriumsulfat $NaHSO_4$ neuerdings Salpetersäure und secundäres oder gewöhnliches Natriumsulfat Na_2SO_4.

Schon bei einer Temperatur von 86° C zerfällt die Salpetersäure nach der Gleichung:

$$2\,HNO_3 = 2\,NO + H_2O + O_2 + O$$

und dieser frei werdende Sauerstoff veranlasst nun die kräftig oxydierende Wirkung der Salpetersäure, wie sie speciell bei der Schwefelsäureerzeugung nothwendig ist. Das Stickoxyd NO nimmt als ungesättigte Verbindung aus der beim Schwefelsäureprocesse vorhandenen Luft den nöthigen Sauerstoff zur Bildung von Stickstoffdioxyd NO_2 und reconstruiert mit Hilfe der Atomgruppe HO des in Zersetzung begriffenen Wasserdampfes die Salpetersäure. Während also bei der Herstellung von Salpetersäure aus Salpeter und Schwefelsäure die letztere im Verhältnisse ihres Moleculargewichtes beim Processe verbraucht wird, betheiliget sich die zur Herstellung der Schwefelsäure verwendete Salpetersäure beim Aufbaue der Schwefelsäuremolecüle nur als Vermittlerin (Katalyse).

Die beiden Säuren H_2SO_4 und HNO_3 unterscheiden sich speciell darin, dass die erstere zwei Wasserstoffatome enthält, während in letzterer nur eines vorkommt. Man bezeichnet daher die erstere als zweibasisch, letztere dagegen als einbasisch. Wenn in ersterer nur ein Wasserstoffatom durch ein einwertiges Metallatom ersetzt wird und also im entstandenen Salze noch ein ebenfalls ersetzbares Wasserstoffatom verbleibt, wie es beim primären Natriumsulfat $NaHSO_4$ der Fall war, so spricht man von einem „saueren Salze"; wenn aber in einem Salze kein ersetzbares Wasserstoffatom vorkommt, so nennt man es ein „neutrales Salz".

Die Salze der Salpetersäure heißen Nitrate. Es gibt aber auch Salze, die aus einer Säure mit der Formel HNO_2 abgeleitet werden können, welche man „salpetrige Säure" nennt; diese ist aber nicht beständig, weil sie nach der Gleichung:

$$2\,HNO_2 = N_2O_3 + H_2O$$

in die beiden gesättigten Verbindungen N_2O_3, Stickstofftrioxyd, und Wasser zerfällt. Da sich das Silber in der Salpetersäure löst, während dies beim Golde nicht der Fall ist, und daher letzteres von ersterem durch Lösung unterschieden werden kann, so führt die Salpetersäure auch den Namen „Scheidewasser".

In diese Familie von Elementen gehört auch der Phosphor. In der Natur kommt er mit Calcium und Sauerstoff im Phosphorit und Apatit vor und bildet auch einen wesentlichen Bestandtheil der thierischen Knochen. Wird die nach deren Verbrennung zurückbleibende Asche mit Schwefelsäure behandelt, so erhält man nach der Gleichung: $Ca_3(PO_4) + 3\,H_2SO_4 = 3\,CaSO_4 + 2\,H_3PO_4$,
schwefelsauren Kalk oder Gips $CaSO_4$ und Orthophosphorsäure H_3PO_4. Den fast unlöslichen Gips entfernt man aus der Lösung durch Filtrieren, und um den Phosphor vom Wasserstoffe und Sauerstoffe zu trennen, benützt man die Eigenschaft der glühenden Kohle, dass sie den meisten Oxyden den Sauerstoff zu entziehen vermag. Beim Trocknen

der mit Kohle gemischten Orthophosphorsäure geht dieselbe in Metaphosphorsäure HPO_3 über und dann erhalten wir nach der Gleichung:

$$4\,HPO_3 + 12\,C = 2\,H_2 + 12\,CO + 4\,P$$

freien Wasserstoff, Kohlenoxyd und reinen Phosphor.

Der Phosphor hat eine gelbliche Farbe und ist sehr giftig. Auch die durch brennenden Phosphor hervorgerufenen Wunden sind sehr gefährlich. Wird er unter Luftabschluss über 300° C erwärmt, so bildet er ein rothes Pulver, welches nicht mehr giftig ist. Schon bei gewöhnlicher Temperatur entwickeln sich Phosphordämpfe, die infolge eines langsamen Verbrennungsprocesses im Dunkeln leuchten. Diese Erscheinung darf aber mit der optischen Erscheinung der Phosphorescenz nicht verwechselt werden, da dieselbe ganz anderer Natur ist.

Um den Phosphor vor dieser langsamen Oxydation zu schützen, bewahrt man ihn unter Wasser auf. Bei den sogenannten schwedischen Zündhölzchen befindet sich auf der Reibfläche rother, also ungiftiger Phosphor, der die auf dem Hölzchen klebende Mischung von Kaliumchlorat und Schwefelantimon beim Reiben entzündet.

Analog den entsprechenden Stickstoffverbindungen existiert auch eine Verbindung von Wasserstoff und Phosphor, der Phosphorwasserstoff PH_3 und eine Reihe von Sauerstoffverbindungen, deren wichtigste das Phosphorpentoxyd P_2O_5 ist. Je nachdem sich dasselbe mit 1, 2 oder 3 Wassermolecülen verbindet, erhalten wir

Metaphosphorsäure $H_2O + P_2O_5 = 2\,HPO_3$,
Pyrophosphorsäure $2\,H_2O + P_2O_5 = H_4P_2O_7$,
Orthophosphorsäure $3\,H_2O + P_2O_5 = 2\,H_3PO_4$.

Erstere ist also einbasisch, letztere dreibasisch. Werden einzelne H-Atome durch Metalle ersetzt, so erhält man „Phosphate", und zwar primäre, secundäre oder tertiäre, je nachdem 1, 2 oder 3 H-Atome durch Metallatome ersetzt wurden.

Ein anderes Element dieser Familie, das sich ebenfalls durch seine giftigen Wirkungen auszeichnet, ist das Arsen. In der Natur kommt es im Arsenkies in Verbindung mit Eisen und Schwefel, im Glanzkobalt mit Kobalt und Schwefel und mit Schwefel allein als Auripigment As_2S_3 und Realgar As_2S_2 vor. Auch das Oxyd As_2O_3 kommt mineralisch als Arsenikblüte vor. Das Arsenik bildet auch eine Wasserstoffverbindung, und zwar von der Form AsH_3, und mehrere Oxyde mit verschiedenem Sauerstoffgehalte. Ferner besteht eine Metaarsensäure $HAsO_3$, eine Pyroarsensäure $H_4As_2O_7$ und eine Orthoarsensäure H_3AsO_4. Das Schweinfurter Grün, eine sehr schöne, aber giftige Farbe, hat die Zusammensetzung $CuHAsO_3$.

Hieher gehören ferner die im Grauspiesglanz und Wismutglanz vorkommenden Metalle Antimon und Wismut. Ersteres wird bei Legierungen zur Herstellung der Buchdruckerlettern und des Britanniametalles, sowie auch in der Pyrotechnik verwertet, letzteres dagegen zeichnet sich durch die Eigenschaft aus, dass sein elektrischer Widerstand im magnetischen Felde zunimmt, weshalb es auch zur Messung magnetischer Felder verwendet wird.

An der Spitze der Elemente der IV. Familie steht der Kohlenstoff. Im krystallinischen Zustande kommt er in der Natur als Diamant vor und zeichnet sich als solcher durch seine außerordentliche Härte und durch sein starkes Lichtbrechungsvermögen aus. Der durch die Härte bedingte Glanz gut geschliffener Flächen und das mit der Lichtbrechung verbundene Farbenspiel geben ihm den hohen Wert als Edelstein. Sehr reiner Kohlenstoff ist auch der oberhalb von Feuerungsstellen sich ansetzende Ruß und der mineralische Graphit (Reißblei). Der Kohlenstoffgehalt der verschiedenen Steinkohlenarten ist ein sehr wechselnder; Anthracit enthält 94%, Cannelkohle 86%, Braunkohle 67% und der Torf etwa 60%.

Die noch mit dem Kohlenstoffe verbundenen Elemente: Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff deuten auf den vegetabilischen Ursprung dieser Mineralien hin. Das in Sümpfen aus zersetzten Pflanzenresten sich entwickelnde Sumpfgas oder Methan CH_4 lässt den Kohlenstoff als vierwertiges Element erkennen. Dieses Gas bildet sich auch in Kohlenbergwerken, wo es, mit Luft gemischt, die unmittelbare Ursache der sogenannten schlagenden Wetter bildet. Künstlich wird es dargestellt durch Erhitzen von Natriumacetat und Aetzkalk.

Mit dem Sauerstoffe der Luft verbindet es sich unter Explosionserscheinungen nach der Gleichung: $CH_4 + 2\,O_2 = CO_2 + 2\,H_2O$
zu Kohlensäure und Wasser. Eine andere für das Beleuchtungswesen wichtige Wasserstoffverbindung ist das Acetylen C_2H_2; dieses wird mit Hilfe des in einem elektrischen Ofen hergestellten Calciumcarbides C_2Ca dadurch gewonnen, dass man das Carbid mit Wasser in Berührung bringt; dann bildet sich nach der Gleichung:

$$C_2Ca + 2\,H_2O = Ca(OH)_2 + C_2H_2$$

Calciumhydroxyd und Acetylen. Auch dieses Gas gibt mit Luft heftig explodierende Mischungen. Bei hinreichender Sauerstoffzufuhr brennt es mit helleuchtender Flamme, sonst wird der nicht verbrannte Kohlenstoff in der düster brennenden Flamme in Gestalt großer Rußflocken ausgeschieden.

Eine dritte ähnliche Verbindung, das Aethylen C_2H_4, erhält man durch Erhitzen eines Gemisches von Alkohol und Schwefelsäure, welche ersterem die Elemente des Wassers entzieht: $C_2H_6O = H_2O + C_2H_4$.
Auch dieses Gas brennt bei hinreichender Sauerstoffzufuhr mit helleuchtender Flamme und ist mit Luft gemischt sehr explosibel.

Die wichtigsten Sauerstoffverbindungen sind das Kohlenmonoxyd oder Kohlenoxyd CO und das unter dem Namen Kohlensäure bekannte Kohlendioxyd CO_2. Beim Verbrennen der Kohlen in einem Herde bildet sich zuerst CO_2, dem dann die glühende Kohle, über die es noch streicht, ein Sauerstoffatom entzieht; bei hinreichendem Luftzutritt geht aber das so entstandene Kohlenoxyd in die sauerstoffreichere Verbindung CO_2 über.

Das Kohlenoxyd bildet sich also auch, wenn durch Absperrung des Kamines die Kohlen im Ofen unter sehr schwachem Luftzutritt verbrennen. Die tödtliche Wirkung dieses Gases beruht darauf, dass unter seinem Einflusse der Farbstoff der rothen Blutkörperchen unfähig wird, sich an der Aufnahme des Sauerstoffes aus der Luft wirksam zu betheiligen.

Das Kohlendioxyd tritt im Freien in der Nähe von Vulkanen in gasförmigem Zustande auf und kommt auch dem Wasser beigemengt in den „Säuerlingen" vor. In Verbindung mit dem vegetabilischen Leben erscheint es als Zersetzungsproduct beim Athmungsprocesse und könnte von diesem Standpunkte aus wie die anderen Ausscheidungsproducte als organische Verbindung aufgefasst werden.

Die Bezeichnung Kohlensäure ist strenggenommen nicht richtig, da der Verbindung CO_2 der Wasserstoff fehlt; sie lässt sich aber insoferne einigermaßen rechtfertigen, als es eine Menge von Metallverbindungen gibt, die man als Carbonate bezeichnet und die sich aus einer, im freien Zustande nicht existierenden Säure ableiten lassen, welche nach der Gleichung $H_2CO_3 = CO_2 + H_2O$ sehr leicht in die sogenannte Kohlensäure CO_2 und Wasser zerfällt. So erhält man z. B. durch Einleiten von Kohlensäure in eine Lösung von Natriumhydroxyd nach der Gleichung:

$$2\,NaHO + CO_2 = Na_2CO_3 + H_2O,$$

also Natriumcarbonat Na_2CO_3 und Wasser. Die Kohlensäure kann man auch herstellen, indem man kohlensauren Kalk, also z. B zerbröckelte Kreide, im Wasserstofferzeugungs-Apparate mit Schwefelsäure übergießt, wobei sich nach der Gleichung:

$$CaCO_3 + H_2SO_4 = CaSO_4 + CO_2 + H_2O$$

schwefelsaurer Kalk $CaSO_4$, Wasser und Kohlendioxyd bildet.

Das Kohlensäuregas ist so dicht, dass man es wie eine Flüssigkeit von einem Gefäß in ein anderes schütten kann; da es das Brennen nicht unterhält, so löscht eine Kerzenflamme aus, wenn man ein Becherglas voll Kohlensäure darüber ausgießt.

Die flüssige Kohlensäure wird bereits in gusseisernen Flaschen in den Handel gebracht und dazu benützt, um auf eine, mit der flüssigen Kohlensäure in Verbindung stehende Flüssigkeit einen großen Druck auszuüben. Auch lassen sich mit Hilfe der flüssigen Kohlensäure sehr tiefe Temperaturen herstellen, weil sie, in einen Tuchsack ausfließend, infolge der plötzlichen Verdünnung so rasch abgekühlt wird, dass sie sogar in den festen Zustand übergeht und dabei eine Temperatur von etwa -80^0 C annimmt.

Da Calciumhydroxyd oder gelöschter Kalk im Wasser in geringer Menge löslich ist, während der kohlensaure Kalk im Wasser unlöslich ist, so leitet man die Kohlensäure in Kalkwasser ein, um sie als solche an der eintretenden Trübung des Wassers zu erkennen.

Das Leuchtgas gewinnt man durch trockene Destillation von Steinkohlen, die in großen, verschlossenen Retorten aus Thon erhitzt werden. Das sich entwickelnde Gas wird dann vom Ammoniakgehalte gereinigt. Die in den Retorten zurückbleibenden „Koks" können noch zur Heizung verwendet werden. Aus einer Tonne Steinkohlen erhält man beinahe 300 m^3 Leuchtgas, welches ungefähr $50^0/_0$ Wasserstoff, $33^0/_0$ Methan, $8^0/_0$ Kohlensäure und noch mehrere andere Bestandtheile enthält.

Die Flamme. Das den sogenannten Fischschwanzbrennern entströmende Leuchtgas tritt so rasch in den Verbrennungsprocess ein, dass durch die Verbrennung ein Theil des ausströmenden Gases rasch zersetzt und der dabei ausgeschiedene Kohlenstoff durch die Hitze der Flamme zum Leuchten gebracht wird. Beim Bunsenbrenner wird das Gas, bevor es noch zur Entzündung kommt, mit Luft gemischt, sodass wir in der Flamme nur mehr brennendes Gas besitzen, das wohl eine große Hitze, aber

keine nennenswerte Leuchtkraft besitzt. Die Leuchtkraft des Auerlichtes beruht darauf, die hohe Temperatur der Flamme eines Bunsenbrenners zur Erwärmung eines mit seltenen Erden imprägnierten Gewebes zu verwenden, das bei dieser Temperatur einen relativ großen Theil der Wärme in Licht verwandelt. In der Flamme des Bunsenbrenners lassen sich deutlich zwei Gebiete erkennen, deren Abgrenzung noch schärfer hervortritt, wenn der Luftstrom mit größerer Kraft in die Flamme getrieben wird, wie es beim Löthrohr geschieht. Wir können dann die Bunsen- wie auch die Löthrohrflamme als eine Zusammensetzung zweier in einander geschalteter Flammen auffassen; bei der inneren strömt die Luft in das brennende Leuchtgas ein, bei der äußeren strömt dagegen das brennende Leuchtgas in die Luft aus. In der ersteren wird ein Körper unter gesteigertem Luftzutritte stark erhitzt und oxydiert, wenn er sich überhaupt mit Sauerstoff leicht verbindet, man bezeichnet daher den inneren Theil der Flamme als die Oxydationsflamme; in der äußeren Flamme dagegen herrscht die reducierende Thätigkeit des Kohlenstoffes vor, der bei dieser Temperatur den Oxyden den Sauerstoff entzieht, und daher wird dieser Theil der Löthrohrflamme die Reductionsflamme genannt.

Die erste Leuchtgasbereitung fand im Jahre 1786 zu Paris statt, aber erst im Jahre 1808 gelang es Winzler aus Znaim, die Gasbeleuchtung im großen Stile durchzuführen und zur Straßenbeleuchtung in London zu verwerten.

Bei der Kerzenflamme werden alle der Leuchtgasfabrication analogen Operationen in unmittelbarer Nähe der Flamme vorgenommen. Die Flamme muss also zuerst das zu ihrer Erhaltung dienende Wachs, Stearin oder Paraffin schmelzen, damit es der Docht durch seine Saugwirkung im flüssigen Zustande der Stelle zuführen kann, wo es unter gleichzeitiger Zersetzung zur Erzeugung der brennenden Gase verwendet wird. Da der innere Theil der Flamme der Luftzufuhr entbehrt, und daher die Gase zersetzt werden, so ist die Flamme eine leuchtende.

Wie mit dem Sauerstoffe, so geht der Kohlenstoff auch mit dem Schwefel eine Verbindung ein, und diese ist der Schwefelkohlenstoff CS_2.

Der Schwefelkohlenstoff wird fabriksmäßig gewonnen, indem man Schwefeldämpfe in eisernen Röhren mit stark erhitzten Holzkohlen in Berührung bringt und dann in einem weiteren abgekühlten Röhrensysteme das entwickelte Gas condensiert. Die so gewonnene farblose Flüssigkeit besitzt ein sehr starkes Lichtbrechungsvermögen und vermag Fette, Harze, Jod, Schwefel und Phosphor zu lösen. Entzündet, brennt die Flüssigkeit mit blauer Flamme und zersetzt sich dabei nach der Gleichung:

$$CS_2 + 3\,O_2 = CO_2 + 2\,SO_2.$$

Vom Silicium tritt in der Natur besonders häufig das Dioxyd SiO_2 als Kieselsäure oder Kieselerde auf. Die dem Methan analoge Verbindung SiH_4 ist entzündbar, wenn auch nicht explosibel. Auch das Silicium besitzt eine Sauerstoffverbindung SiO_2, die man als Säure bezeichnet, obwohl sie keinen Wasserstoff enthält; sie bildet den krystallinischen Quarz, im reinsten Zustande als Bergkrystall, mit verschiedenen Beimengungen den Amethist, Jaspis, Carneol, Achat, Opal und Feuerstein. Streng genommen käme auch hier nur der Verbindung H_2SiO_3 der Name Säure zu. Die Salze der letzteren heißen Silicate. Das Siliciumdioxyd ist sehr schwer schmelzbar. Erst in der Knallgasflamme lässt es sich so weit erweichen, dass man es fadenförmig ausziehen kann (Quarzfäden).

Die Silicate sind besonders wichtig für die Glasfabrication. Durch Zusammenschmelzen von Quarzsand mit gereinigter Pottasche oder Kaliumcarbonat K_2CO_3 erhält man Kaliumsilicat oder Kaliumwasserglas K_2SiO_3, mit Natriumcarbonat oder Soda Na_2CO_3 Natriumsilicat Na_2SiO_3 oder Natriumwasserglas und mit Calciumcarbonat oder Kalk $CaCO_3$ Calciumsilicat $CaSiO_3$. Letzteres ist im Gegensatze zu den beiden ersteren im Wasser unlöslich. Die gebräuchlichsten Glassorten sind Mischungen von Kalium- und Natriumsilicaten mit Calciumsilicaten und besitzen einen Überschuss von Siliciumdioxyd. Die leichter schmelzbaren Gläser enthalten Natriumsilicat, das schwerschmelzbare böhmische Glas mehr Kaliumsilicat und Kieselsäure. Letzteres eignet sich daher besser zu Apparaten, die hohen Temperaturen ausgesetzt werden. Wird das Calciumsilicat durch Bleisilicat ersetzt, so bezeichnet man das Glas als Flintglas, und im Gegensatze zu diesem alle früher erwähnten bleifreien Gläser als Kron- oder Crownglas. Das Flintglas hat ein stärkeres Farbenzerstreuungsvermögen und wird besonders zur Herstellung optischer Linsen verwendet.

In dieselbe Familie gehört noch eine zweite Gruppe von Elementen, nämlich die Metalle Zinn und Blei. Ersteres ist wohl seit den ältesten Zeiten bekannt, da es

sich aus dem Zinnstein, dem Zinndioxyd durch Erhitzen mit Kohle relativ leicht in den metallischen Zustand überführen lässt; dies geschieht nach der Gleichung:

$$2\,Sn\,O_2 + 2\,C_2 = Sn_2 + 4\,C\,O.$$

Wegen seiner großen Dehnbarkeit wird es zu Zinnfolie oder Stanniol verarbeitet und auch zum Verzinnen von metallenen Kochgeschirren verwendet. Als Legierungsbestandtheil kommt es in der Bronze und im Schnell- oder Weichlot vor. In der Bronze macht es je nach der Qualität 31—11 % aus, bei letzterem wird es meist zu gleichen Theilen oder in doppelter Menge mit Blei gemischt. Eine Legierung von Zinn und Quecksilber wird als Zinnamalgam zur Belegung von Spiegeln verwendet.

Das Blei kommt als Sulfid $Pb\,S$ im Bleiglanze und als Carbonat $Pb\,C\,O_3$ im Weißbleierze vor. Die erstgenannten Erze werden durch starkes Erhitzen unter Luftzutritt nach der Gleichung: $2\,Pb\,S + 3\,O_2 = 2\,Pb\,O + 2\,S\,O_2$ in Bleioxyd und Schwefeldioxyd zerlegt und dann das Bleioxyd durch glühende Kohle nach der Gleichung: $2\,Pb\,O + C_2 = Pb_2 + 2\,C\,O$ reduciert. Das metallische Blei ist ziemlich weich und eignet sich daher vorzüglich zum Anlegen kleiner Röhrenleitungen.

Taucht man einen Zinkstab in die Lösung eines Bleisalzes, so löst sich das Zink auf, während sich das Blei in „dendritischen“ Formen als sogenannter „Bleibaum“ nach der Gleichung ausscheidet: $2\,Pb\,(N\,O_3)_2 + 2\,Zn = 2\,Zn\,(N\,O_3)_2 + Pb_2$.

Seine Legierung mit Antimon gibt Letternmetall. Wegen seiner großen Dichte wird es dazu verwendet, um den Stativen der Apparate größere Stabilität zu geben.

Eine andere wertvolle Verwendung findet das Blei bei der Herstellung der elektrischen Accumulatoren. Von den beiden in Schwefelsäure getauchten Bleiplatten ist die eine röthlichbraune, der positive Pol, mit Bleisuperoxyd $Pb\,O_2$, die hellgraue, negative Platte dagegen mit Bleisulfat $Pb\,S\,O_4$ überzogen. Geht durch den Accumulator ein elektrischer Strom, und zwar von der positiven Platte durch die Schwefelsäure zur negativen, so bewirkt er an der ersteren, der Anode, eine Vermehrung des Bleisuperoxydes, während sich an der negativen Platte, der Kathode, der frei gewordene Wasserstoff mit der Atomgruppe $S\,O_4$ des Sulfates zu Schwefelsäure verbindet, wobei sich das Blei als schwammige Masse ausscheidet und die Schwefelsäure an Concentration zunimmt. Dies ist der chemische Vorgang beim Laden des Accumulators. Beim Entladen geht der Strom in der entgegengesetzten Richtung durch den Accumulator, und damit treten auch an beiden Platten die entgegengesetzten Wirkungen auf. Die positive Platte gibt Sauerstoff an den elektrolytisch ausgeschiedenen Wasserstoff ab, und an der negativen geht das früher ausgeschiedene Blei wieder in Sulfat über. Beide Reactionen arbeiten jetzt also auf eine Verdünnung der Schwefelsäure hin, und daher bildet ihre in Beaumègraden ausgedrückte Concentration einen Maßstab für die Ladungsstärke. Um schneller die wünschenswerte Lockerung der Oberfläche auf den Bleiplatten zu erzielen, füllt man die an denselben angebrachten Vertiefungen mit rothem Bleioxyd oder mit Mennige $Pb_3\,O_4$ aus, das sonst als Anstreichfarbe für eiserne Gegenstände benützt wird, um sie vor der oxydierenden Wirkung der atmosphärischen Luft zu schützen.

Elemente der III. Familie. Das Metall Aluminium ist von allen Metallen das leichteste und würde sich daher sehr dazu eignen, um größeren Metallconstructionen ein relativ geringes Gewicht zu geben, wenn es im reinen Zustande einen höheren Grad von Festigkeit besitzen würde. Die sehr feste Aluminiumbronze enthält nur 5—12% Aluminium, dagegen besitzt das ebenfalls sehr gut verwendbare Magnalium nebst dem Aluminium nur 10—25% Magnesium und hat ein specifisches Gewicht von 2·2—2·5.

Eine andere wertvolle Eigenschaft des Aluminiums ist die, dass es Eisenoxyde unter gleichzeitiger Entwicklung großer Wärmemengen zu reducieren vermag. Das so geschmolzene Eisen ist frei von Kohlenstoff und daher zur Magnetisierung sehr geeignet. Das Aluminium wird jetzt ausschließlich auf elektrolytischem Wege gewonnen. Dabei wird eine Mischung von Aluminiumoxyd und Kryolit in der Hitze des elektrischen Lichtbogens gleichzeitig der Elektrolyse unterworfen. Das Oxyd $Al_2\,O_3$ kommt in der Natur als Rubin, Saphir, Korund, Schmirgel und Thonerde vor. Der in ausgedehnten Lagern vorkommende Kaolin kann als Aluminiumsalz einer Kieselsäure betrachtet werden. Bei der Verwitterung unter dem Einflusse der atmosphärischen Kohlensäure wird er zersetzt und tritt dann als weiße, erdige Masse auf, die mit Wasser angerührt einen modellierbaren Teig bildet. Den durch Kalk, Magnesit und Quarzsand verunreinigten Thon bezeichnet man als Lehm. Mit Schwefelsäure erhitzt, geht der Kaolin unter Ausscheidung von Siliciumdioxyd und Wasser in Aluminiumsulfat über:

$$Al_2\,Si_2\,O_7 + 3\,H_2\,S\,O_4 = Al_2\,(S\,O_4)_3 + H_6\,Si_2\,O_7 = Al_2\,(S\,O_4)_3 + 3\,H_2\,O + 2\,Si\,O_2.$$

Beim Abdampfen der Lösung scheidet sich $Al_2\,(S\,O_4)_3 + 18\,H_2\,O$ in Gestalt weißer Krystalle aus. Durch Zusatz von Kalium-, Natrium- oder Ammoniumsulfat erhält man

die ähnlich aufgebauten Alaune, den Kalialaun $KAl(SO_4).12 H_2O$, Natriumalaun $NaAl(SO_4)_2.12 H_2O$, Ammoniumalaun $NH_4Al(SO_4)_2 12 H_2O$ u. s. w.; ähnliche Alaune wie die des Aluminiums bilden auch Eisen, Chrom und Mangan.

Während die eisen- und kalkhältigen Lehmarten in den Ziegelöfen zu Back- und Ziegelsteinen gebrannt werden, dient der reine Kaolin zur Herstellung der Porcellanwaren. Erstere sind porös und werden manchmal mit einer Glasur überzogen, die entsteht, wenn sich durch Einführung von Natriumhydroxyd NHO an deren Oberfläche ein *Na-Al*-Silicat bildet. Bei den Porcellanwaren sind die Poren durch geschmolzene Silicate ausgefüllt. Die so verarbeitete Thonerde ist das gebräuchlichste, feuerfeste Material für Herde, Öfen und Kochgeschirre.

Die noch in diese Familie gehörigen Elemente sind von relativ geringerer Bedeutung.

Elemente der II. Familie. Das Calcium findet sich in der Natur in ungeheueren Mengen als kohlensaurer Kalk $CaCO_3$ im Kalkspath, Arragonit und Marmor, sowie auch in der Kreide, als schwefelsaurer Kalk $CaSO_4$ im Gips und im Alabaster. Aus ersterem erhält man Calciumoxyd CaO, indem man den kohlensauren Kalk in Kalköfen „brennt", wodurch derselbe nach der Gleichung: $CaCO_3 = CaO + CO_2$ in Calciumoxyd und Kohlensäure zerfällt. Wird dann der gebrannte Kalk durch Begießen mit Wasser „gelöscht", so bildet sich nach der Gleichung: $CaO + H_2O = Ca(HO)_2$ das für die Mörtelbereitung wichtige Calciumhydroxyd. Mit Wasser und Sand zu einem Brei angerührt, nimmt es nämlich aus dem Wasser und aus der Luft Kohlensäure auf, und der sich so bildende, kohlensaure Kalk gibt dann das Bindemittel ab, welches die Sandkörnchen zu einem festen Conglomerat vereinigt. Magnesiumhältiger Kalk ist hiezu viel weniger geeignet und wird im Gegensatze zum reinen, „fetten" Kalke als „magerer" Kalk bezeichnet. Wird der kohlensaure Kalk zuerst mit Kieselsäure und Thonerde gemischt und dann erst gebrannt und pulverisiert, so tritt die Härtung des angerührten Breies sehr rasch ein, und die Bestandtheile verbinden sich selbst unter Wasser zu einer steinartigen Masse. Diese unter dem Namen „Cement" bekannte Mörtelart wird daher hauptsächlich zu Wasserbauten verwendet.

Mit Kohle im elektrischen Ofen erhitzt, gibt das Calciumoxyd nach der Gleichung: $2 CaO + 3 C_2 = 2 C_2Ca + 2 CO$ das Calciumcarbid, eine graue, harte, krystallinische Masse, die bei der Berührung mit Wasser reines Acetylengas und Calciumhydroxyd liefert.

Wenn man Calciumcarbonat in Salzsäure löst, so erhält man nach der Gleichung: $CaCO_3 + 2 HCl = CaCl_2 + CO_2 + H_2O$ Calciumchlorid, Kohlensäure und Wasser. Aus der concentrierten Lösung krystallisiert dann das Calciumchlorid mit 6 Molecülen Wasser aus. Diese der Formel $CaCl_2.6 H_2O$ entsprechenden Krystalle sind im hohen Grade hygroskopisch und werden daher, wie die Schwefelsäure, zum Trocknen der Gase verwendet.

Durch Einleiten von Chlor in eine Lösung von gelöschtem Kalk erhält man nach der Gleichung: $2 Ca(HO)_2 + 2 Cl_2 = Ca(OCl)_2 + CaCl_2 + 2 H_2O$ ein Gemenge zweier Calciumverbindungen, welches Chlorkalk genannt wird. Der Chlorkalk wird als Bleichmittel verwendet und ist als stark antiseptisches Desinfectionsmittel für die Hygiene von großer Bedeutung.

Der schwefelsaure Kalk oder Gips gibt erwärmt sein Krystallwasser ab und geht nach Aufnahme desselben sofort wieder in den krystallinischen Zustand über. Darauf beruht seine Verwendbarkeit zur Herstellung von Gipsabgüssen. Der käufliche, fein gemahlene Gips ist wasserfrei, wird daher, mit Wasser zu einem Brei angerührt, sehr rasch wieder hart, und behält dann die Form bei, in die man den flüssigen Brei gegossen hat.

Das Magnesium kommt als Carbonat im Magnesit $MgCO_3$ und, mit Calciumcarbonat verbunden, im Dolomit $MgCa(CO_3)_2$ in großen Mengen vor. Mit Salzsäure übergossen, gibt Magnesiumcarbonat nach der Gleichung:

$$MgCO_3 + 2 HCl = MgCl_2 + H_2O + CO_2$$

Kohlensäure und eine wässerige Lösung von Magnesiumchlorid $MgCl$, welches zur Sodafabrication verwendet wird. Das metallische Magnesium wird jetzt aus dem geschmolzenen Chloride auf elektrolytischem Wege hergestellt. In der Luft, und noch mehr in Sauerstoff, brennt das Magnesiummetall mit blendend weißer Flamme; man benützt es daher in der Photographie als künstliche Lichtquelle. Dabei bildet sich ein weißes Pulver, das Magnesiumoxyd oder die Magnesia usta MgO, welche in der Medicin mit Ferrisulfat gemischt, als Gegenmittel bei Arsenvergiftungen gegeben wird.

Das schwefelsaure Salz $MgSO_4 . 7 H_2O$ führt den Namen „Bittersalz“ und wird zu medicinischen Zwecken, sowie auch beim galvanischen Elemente von Meidinger verwendet.

Die zweite Gruppe dieser Familie bilden die drei einatomigen Elemente: Zink, Quecksilber und Cadmium. Das Zink kommt als Carbonat im Galmei $ZnCO_3$, als Sulfid in der Zinkblende ZnS und als Silicat im Kieselzinkerz Zn_2SiO_4 vor. Das Metall wird aus dem Sulfid nach vorausgegangenem Röstprocesse durch Reduction mit Kohle gewonnen, da $2 ZnS + 3 O_2 = 2 ZnO + 2 SO_2$ und $2 ZnO + C_2 = 2 Zn + 2 CO$. Während dabei ein Theil des Zinkes im geschmolzenen Zustande abfließt, geht ein anderer in Dampfform über und fällt bei der Abkühlung als Zinkstaub nieder. Das Zinkblech findet zum Dachdecken und zur Herstellung von Wasserbehältern ausgedehnte Verwendung. Bei den verschiedensten galvanischen Elementen bildet es stets den negativen Pol. Das beim Verbrennen des Zinkes sich bildende Zinkoxyd ZnO gibt eine weiße, sehr dauerhafte Anstreichfarbe.

Messing ist eine Legierung von Zink und Kupfer. Das Mischungsverhältnis ist ein sehr verschiedenes. Es gibt Messingsorten, die gleiche Theile Zink und Kupfer enthalten, oder es entfallen auf einen Theil Zink zwei bis fünf Theile Kupfer.

Cadmium verhält sich besonders hinsichtlich seiner Verbindungen ähnlich wie Zink und Magnesium. Mit Wismut und Blei gibt es die Wood'sche Legierung.

Das Quecksilber findet sich meist im metallischen Zustande in Tropfenform in der Nähe seines Sulfides, also auf zinnoberhältigen Mineralien. Aus letzteren wird es durch Rösten gewonnen, wobei sich Schwefeldioxyd bildet, und die Quecksilberdämpfe geben condensiert das metallische Quecksilber. Es eignet sich vorzüglich zur Füllung der Barometer und der Thermometer. Durch die Erfindung der Quecksilberpumpen ist es für die Physik besonders wertvoll geworden.

Eine charakteristische Eigenschaft des Quecksilbers ist die, dass es fast mit allen Metallen Legierungen eingeht, die man als Amalgame bezeichnet. Aus Silber und Gold gefertigte Gegenstände müssen daher sorgfältig vor jeder Berührung mit metallischem Quecksilber geschützt werden. Andererseits benützt man aber wieder diese Eigenschaft bei der Goldgewinnung, um das Metall von seinem Muttergestein zu trennen. Eisen wird vom Quecksilber direct nicht angegriffen. Um das Quecksilber von mechanischen Unreinigkeiten, die es in sich aufgenommen hat, zu reinigen, benützt man die Quecksilberpresse. Chemisch verbundene Zusätze werden am leichtesten dadurch weggeschafft, dass man das Quecksilber in einem langen, dünnen Strahle durch Salpetersäure von der Dichte 1·1 herabfallen lässt.

Es gibt zwei Sauerstoffverbindungen, nämlich das Quecksilberoxydul Hg_2O und das Quecksilberoxyd HgO; letzteres erhält man durch andauerndes Erhitzen des Quecksilbers an der Luft, wobei sich ein graues und nach dem Abkühlen rothes Pulver bildet. Bei stärkerer Erwärmung gibt es seinen Sauerstoffgehalt wieder ab.

Wenn man Quecksilber in concentrierter Salpetersäure löst und der Lösung Alkohol zusetzt, so erhält man das Knallquecksilber $C_2N_2O_2Hg$, das durch einen kräftigen Stoß zur Explosion gebracht werden kann und daher zur Füllung der Zündhütchen verwendet wird.

Elemente der I. Familie. Zur ersten Gruppe dieser Familie gehören unter anderen die Alkalimetalle Kalium und Natrium. Das Natrium findet sich als Silicat im Natronfeldspat, als Nitrat im Chilesalpeter, und seine Verbindung mit Chlor, das Chlornatrium oder Kochsalz bildet große Steinsalzlager und ist auch ein Hauptbestandtheil des Meerwassers. Das Natriumcarbonat oder die Soda $Na_2CO_3 . 10 H_2O$ ist eines der wichtigsten Producte der chemischen Großindustrie. Die verbreitetsten Methoden zur Gewinnung desselben sind das Verfahren von Leblanc und das von Solvay.

Beim Leblancverfahren wird Kochsalz mit Schwefelsäure erwärmt, wobei sich Salzsäure und Natriumsulfat bildet. Letzteres wird hierauf mit Kohle erhitzt; dann bildet sich nach der Gleichung:

$$Na_2SO_4 + C_2 = Na_2S + 2 CO_2$$

Natriumsulfid und Kohlendioxyd, und durch Erwärmung des Natriumsulfides mit kohlensaurem Kalk erhält man nach der Gleichung:

$$Na_2S + CaCO_3 = CaS + Na_2CO_3,$$

also eine Mischung Calciumsulfid und kohlensaurem Natrium; letzteres wird mit Wasser „ausgelaugt“ und aus der Lösung durch Abdampfung des Wassers gewonnen.

Nach dem Solvayverfahren wird Ammoniak und Kohlensäure unter großem Druck durch eine concentrierte Kochsalzlösung geleitet, wobei sich Chlorammonium NH_4Cl und $NaHCO_3$, also das saure, kohlensaure Natrium bildet; während das

Chlorammonium gelöst bleibt, scheidet sich das Natriumsalz aus, und wird durch Erhitzung in neutrales, kohlensaures Natrium und Kohlensäure zersetzt:

$$2\,NaHCO_3 = Na_2CO_3 + H_2O + CO_2.$$

Die ergiebigsten Absatzgebiete der gewonnenen Soda sind die Seifen- und Glasfabrication. Auch die zur Reinigung der Wäsche verwendete „Lauge" wird vielfach durch eine Sodalösung ersetzt.

Wenn man Soda mit Schwefelsäure behandelt, so wird nach der Gleichung:

$$H_2SO_4 + Na_2CO_3 = CO_2 + H_2O + Na_2SO_4$$

die Kohlensäure unter sehr großem Drucke ausgeschieden und unter diesem Drucke von dem damit in Berührung kommenden Wasser in größeren Mengen absorbiert. Auf ähnlichem Wege erhält man den künstlichen, „moussierenden" Säuerling, das Sodawasser.

Aus der Soda lässt sich durch Behandlung mit Ätzkalk nach der Gleichung:

$$Na_2CO_3 + Ca(OH)_2 = 2\,NaHO + CaCO_3$$

unter Zusatz von Wasser die Natronlauge herstellen, da sich der kohlensaure Kalk in einer wässerigen Lösung niederschlägt. Aus dem so erhaltenen Ätznatron $NaHO$ wird dann auf elektrolytischem Wege das metallische Natrium gewonnen. In Wasser geworfen zersetzt es dasselbe unter Ausscheidung von Wasserstoff; in ähnlicher Weise vermag es auch auf andere Sauerstoffverbindungen reducierend zu wirken. An der Luft oxydiert es rasch, weshalb man es unter Petroleum aufzubewahren pflegt.

Ganz ähnlich verhält sich das Kalium sowohl im metallischen Zustande, wie auch in Verbindungen, nur verlaufen die Reactionen meistens mit größerer Heftigkeit. In der Natur kommt es im Kalifeldspat als Silicat vor und in Verbindung mit Aluminium im Alaun. An diese Elemente gebunden, bildet es einen wichtigen Bestandtheil der Ackererde. Von hier aus gelangt es durch lösliche Kaliumsalze in die verschiedenen Pflanzenbestandtheile und bleibt beim Verbrennen in der Asche als Pottasche oder Kaliumcarbonat K_2CO_3 zurück. Das im Traubensafte vorhandene Kaliumsalz setzt sich als roher Weinstein in den Fässern ab. Das Kaliumnitrat bildet sich überall, wo organische Abfälle in Fäulnis übergehen und wird auch künstlich in eigenen „Salpeterplantagen" erzeugt, indem man erdiges Material, Holz, Asche und thierische Abfälle haufenweise aufschichtet und mit Jauche übergießt; nach 2—3 Jahren erhält man durch Auslaugung eine Lösung von Kalisalpeter. Das nach Abdampfen des Wassers auskrystallisierende Kaliumnitrat KNO_3 wirkt bei chemischen Processen als kräftiges Oxydationsmittel und findet ausgedehnte Anwendung in der „Feuerwerkerei", sowie auch bei der Herstellung des Schießpulvers. Auf glühender Kohle „verpufft" der „Salpeter" und die dabei stattfindende Reaction entspricht der Gleichung:

$$4\,KNO_3 + 3\,C_2 = 2\,CO_2 + 2\,CO + 2\,N_2 + 2\,K_2CO_3$$

Mit der erforderlichen Menge von Kohle und Schwefel gemischt vollzieht sich bei der Entzündung der Process:

$$4\,KNO_3 + 3\,C_2 + S_2 = 6\,CO_2 + 2\,N_2 + 2\,K_2S.$$

Das entsprechend zusammengesetzte Schießpulver enthält 75% Salpeter, 13% Kohle und 12% Schwefel. Die bei der Explosion erzeugten Gase würden bei gewöhnlicher Temperatur schon das 280fache Volumen des Pulvers ausmachen, und bei der zugleich eintretenden Temperatursteigerung wird dasselbe jedenfalls auf mehr als das 1000fache gesteigert. Aus dieser in einem kleinen Bruchtheile einer Secunde erfolgenden Volumvermehrung erklärt sich die große Beschleunigung, mit der ein Geschoss seine Bewegung im Lauf beginnt, und die hohe Geschwindigkeit, mit der es seine Bahn fortsetzt.

Das metallische Kalium kann aus dem Carbonat durch Reduction mittels Kohle dargestellt werden, und zwar nach der Gleichung:

$$K_2CO_3 + C_2 = K_2 + 3\,CO$$

Das ausgeschiedene Kalium muss wieder unter Petroleum aufgefangen und aufbewahrt werden, da es sonst an der Luft rasch oxydiert. In Wasser gegeben, zersetzt es dasselbe wie das Natrium, aber die Reaktion erfolgt so stürmisch, dass sich der ausgeschiedene Wasserstoff dabei entzündet, und die zugleich eintretenden Explosionen erfordern einige Vorsicht. Das sich im Wasser lösende Kaliumhydroxyd KHO oder Ätzkali bildet die sogenannte Kalilauge. Das Ätzkali kann wie das Ätznatron auch in der Weise hergestellt werden, dass man das Carbonat auf gelöschten Kalk wirken lässt, also nach der Gleichung:

$$Ka_2CO_3 + Ca(OH)_2 = 2\,KHO + CaCO_3$$

Die zweite Gruppe dieser Familie bilden die drei wertvollen Metalle Kupfer, Silber und Gold.

Das Kupfer kommt wie die beiden letztgenannten Metalle in der Natur auch im gediegenen Zustande vor, außerdem als Oxyd im Rothkupfererz, als Carbonat und Hydroxyd im Malachit $CuCO_3 \,.\, Cu(OH)_2$, als Sulfid im Kupferglanz CuS und in Ver-

bindung mit Eisen im Kupferkies $CuFeS_2$. Das relativ häufige Vorkommen des metallischen Kupfers und Kupferoxydes macht es begreiflich, dass dieses Metall schon seit den ältesten Zeiten in Gebrauch ist. Seine Gewinnung aus den Schwefelerzen ist dagegen sehr umständlich und gelingt nur nach wiederholtem Rösten und unter Anwendung geeigneter Flussmittel. Die Reinigung geschieht jetzt häufig auf elektrolytischem Wege, indem man durch eine Platte aus Rohkupfer den Strom in ein Kupfervitriolbad leitet und als Kathode eine Platte aus reinem Kupfer verwendet, die dann immer stärker wird, da sie sich mit dem elektrolytisch ausgeschiedenen Kupfer überzieht, während das Rohkupfer in Lösung geht. Als bester Elektricitätsleiter nächst dem Silber ist es vor allem für die Elektrotechnik von der größten Bedeutung. Sowohl das reine Kupfer, wie auch seine Legierungen lassen sich sehr gut bearbeiten und daher ist es neben dem Eisen wohl das industriell wichtigste Metall. Außer in der Metallbearbeitung findet es noch vielfach Verwendung als Legierungsmittel für Silber und Gold, besonders bei den Münzen. Bei höheren Temperaturen nimmt es Sauerstoff auf und bildet dann ein schwarzes Pulver, das Kupferoxyd CuO; sein Sulfat, das Kupfervitriol $CuSO_4$, findet besonders in der Galvanoplastik ausgedehnte Verwendung.

Das Silber kommt in der Natur ziemlich oft im reinen Zustande vor; aber es findet sich auch als Sulfid im Silberglanz AgS, und endlich in Gesellschaft anderer Sulfide, besonders von Blei, Arsen, Kupfer und Antimon vor. Aus den Bleierzen wird es durch das Pattinson'sche Verfahren gewonnen, indem man das silberhältige Blei abkühlen lässt, wobei reines Blei auskrystallisiert und dann durch Siebe entfernt wird. Auf diesem Wege erhält man etwas silberreicheres Blei, und durch Wiederholung dieses Vorgehens gelangt man schließlich zu einer genügend silberreichen Legierung, aus der das Blei durch Oxydation entfernt wird.

Ein anderes Verfahren benützt die Eigenschaft des Silbers, dass es sich im flüssigen Zink leicht löst. Setzt man dem silberhaltigen Blei Zink zu, so nimmt dieses das Silber in sich auf und kann dann, da es auf dem specifisch schwereren Blei schwimmt, mit seinem Silbergehalte abgeschöpft werden. Schließlich werden die Silbererze auch mit Kochsalz geröstet und das so entstandene Silberchlorid mit Eisen und Wasser behandelt. Von dem sich bildenden Eisenchlorid wird hierauf das Silber durch den Amalgamierungsprocess getrennt und das Quecksilber abgedampft. Mit Kupfer legiert, wird es zu Schmuck- und Nutzgeräthen verarbeitet. Ein sehr großer Theil des Silbers wird zur Münzung verwendet. Aus Silber gefertigte Kunstgegenstände enthalten durchschnittlich gegen 75% Silber, der Silbergehalt der Münzen beträgt meist 90%.

Das Nitrat des Silbers, der Höllenstein, $AgNO_3$ ist in der Medicin als Ätzmittel in Gebrauch. Auf die Verwendung des Silbers bei der Photographie werden wir bei der Besprechung der Halogene zurückkommen, da es mit dem chemischen Verhalten derselben im engsten Zusammenhange steht.

Das Gold kommt, abgesehen von geringfügigen Beimengungen, in der Natur fast nur im gediegenen Zustande vor, was als eine Folge seiner geringen Neigung zu chemischen Verbindungen zu betrachten ist. Seine Gewinnung aus dem Muttergesteine und aus dem Sande mancher Flüsse beruht großentheils auf einer mechanischen Trennung von Beimengungen, da das Gold wegen des großen, specifischen Gewichtes beim „Schlemmen" rasch zu Boden sinkt. Auch der Amalgamierungsprocess kommt vielfach zur Anwendung. Auf der außerordentlich weitgehenden Dehnbarkeit des Goldes beruht das Vergoldungsverfahren, bei dem das Gold in sehr dünnen Blättchen aufgetragen wird. Körper mit metallischer Oberfläche lassen sich auch auf galvanischem Wege vergolden. Der Goldgehalt wird in „Karaten" angegeben, die sich auf 24 Theile der Legierung beziehen, z. B. 14 karatiges Gold enthält in 24 Gewichtstheilen der Legierung 14 Theile reines Gold, oder er wird als „Feingehalt" in Promille ausgedrückt.

In die VII. Familie gehört die Gruppe der Halogene oder Salzbildner: Fluor, Chlor, Brom und Jod. Diese Elemente bilden die stärksten Säuren, während die Alkalimetalle der I. Familie sehr starke basische Verbindungen liefern. Schon bei relativ niedrigen Temperaturen gehen sie in den dampfförmigen Zustand über. Fluor und Chlor erzeugen gelbgrüne, Brom rothbraune und Jod violette Dämpfe, welche die Athmungsorgane stark angreifen.

Fluor findet sich mit Calcium verbunden, im Flusspath, mit Natrium und Aluminium im Kryolith. Es lässt sich sehr schwer im reinen Zustande darstellen. Die Verbindung mit Wasserstoff FH erhält man durch Behandlung des Flusspathes mit Schwefelsäure nach der Gleichung:

$$CaF_2 + H_2SO_4 = CaSO_4 + 2\,FH.$$

Die wässerige Lösung dieser Säure kommt auch als Flussäure in den Handel und wird wegen ihrer zersetzenden Wirkung auf das Glas zum Ätzen desselben verwendet. Zu diesem Zwecke wird die zu ätzende Fläche mit Wachs überzogen und dieses an den Stellen, auf welche die Flussäure wirken soll, wieder weggenommen. Sie wirkt nicht nur auf die Athmungsorgane wie ein heftiges Gift, sondern verletzt auch die Haut in gefährlicher Weise.

Das Chlor kommt in der Natur am häufigsten als Bestandtheil des Kochsalzes, im Steinsalze und im Meere vor, sowie auch in vielen Mineralien. Im Laboratorium stellt man es gewöhnlich in der Weise dar, dass man pulverisierten Braunstein $Mn\,O_2$ mit Salzsäure in einem Kochkolben gelinde erwärmt und das sich entwickelnde Gas über heißem Wasser auffängt oder unmittelbar wie eine Flüssigkeit in ein offenes Becherglas strömen lässt. An der grünen Färbung und an dem stechenden Geruche ist es leicht zu erkennen. Wegen seines hohen specifischen Gewichtes kann man es auch wie eine Flüssigkeit von einem Glase in ein anderes schütten. Die zur Erzeugung des Chlorgases verwendete Reaction entspricht der Gleichung:

$$Mn\,O_2 + 4\,H\,Cl = Mn\,Cl_2 + 2\,H_2\,O + Cl_2.$$

Kupfer, in Form von unechtem Blattgold, pulverisiertes Antimon und andere Metalle verbinden sich mit dem Chlor unter Feuererscheinung wie bei einem Verbrennungsprocesse. Die Flamme von Wasserstoffgas brennt im Chlorgase weiter, wie in der Luft. Um ein bestimmtes Volumen Chlorgas zu absorbieren, ist nur ein halb so großes Volumen Wasser nöthig. Diese Lösung bezeichnet man dann als Chlorwasser; in demselben löst sich sogar Gold auf und bildet Goldchlorid $Au\,Cl_3$.

Zu gleichen Theilen mit Wasserstoffgas gemischt, verbindet es sich mit demselben im directen Sonnenlichte unter Explosionserscheinungen zu Chlorwasserstoff. Im diffusen Tageslichte erfolgt die Verbindung langsam, und das Volumen der Verbindung ist gleich der Summe der Volumina der Bestandtheile. Ein Liter Wasser vermag bei 0° C bei 500 l Chlorwasserstoffgas zu absorbieren, und diese stark sauer reagierende Flüssigkeit nennt man Salzsäure. Die käufliche Salzsäure wird als Nebenproduct bei der Leblanc'schen Sodafabrication gewonnen.

Eine Mischung von drei Raumtheilen Salzsäure und einem Raumtheile Salpetersäure gibt das sogenannte Königswasser, in welchem sich selbst Gold und Platin lösen.

Die Verbindungen des Chlors mit Metallen bezeichnet man als deren Chloride. Lässt man unter gleichzeitiger Erwärmung das Chlor auf Kaliumhydroxyd wirken, so bildet sich nach der Gleichung:

$$6\,KOH + 3\,Cl_2 = K\,Cl\,O_3 + 5\,K\,Cl + 3\,H_2\,O$$

das Kaliumsalz der einbasischen Chlorsäure $H\,Cl\,O_3$, nämlich das chlorsaure Kali oder Kaliumchlorat $K\,Cl\,O_3$. Weil dieses Salz beim Erwärmen Sauerstoff abgibt, so verwendet man es zur Sauerstoffbereitung. Wenn man in eine Lösung von Silber in Salpetersäure, also in eine Lösung, die salpetersaures Silber $Ag\,NO_3$ enthält, etwas Salzsäure gibt, so bildet sich sofort ein weißer Niederschlag, nämlich Silberchlorid $Ag\,Cl$, das aber, dem Lichte ausgesetzt, zuerst violett und dann schwarz wird, weil dabei metallisches Silber ausgeschieden wird. Diese Veränderung des Silbersalzes kann man als eine Lichtempfindlichkeit des Silberchlorides auffassen. In der analytischen Chemie wird das Auftreten dieses Niederschlages als ein Erkennungszeichen für das Vorhandensein von Salzsäure oder von Silbersalzen benützt.

Sowohl im Steinsalze, wie auch im Meersalze kommen noch zwei andere Halogene vor, nämlich Brom und Jod. Letzteres besonders wird von Meerpflanzen aufgenommen und daher auch aus deren Asche gewonnen. Auch diese beiden Elemente bilden Wasserstoffverbindungen, nämlich den Jod- und Bromwasserstoff, und verbinden sich mit Metallen zu Jodiden, beziehungsweise Bromiden. KJ oder Jodkalium ist z. B. das Jodid des Kaliums und $Ag\,Br$ Silberbromid. Wegen ihrer Lichtempfindlichkeit sind das Silberjodid und -Bromid besonders für die Photographie von großer Bedeutung.

Nach dem älteren Verfahren stellte der Photograph unmittelbar vor der Aufnahme das lichtempfindliche Silbersalz dadurch her, dass er eine Glasplatte mit der das Halogensalz enthaltenden Collodiumschichte überzog und dann Silbernitrat auf dieselbe wirken ließ. Statt der so präparierten „nassen Platten" werden jetzt ausschließlich die fabriksmäßig hergestellten „trockenen Platten" verwendet, welche das lichtempfindliche Bromsilber auf einer Gelatineschichte tragen, die natürlich vor jeder Lichtwirkung sorgfältig verwahrt werden muss, bis sie „exponiert" wird. Auf der „Platte" wird dann mittels der Linse ein Lichtbild hervorgerufen. Das Silbersalz verhält sich an den verschiedenen Stellen verschieden, jenachdem dieselben beim Exponieren belichtet worden sind oder nicht. An den ersteren Stellen kann aber durch den „Entwickler", also durch Eisenvitriollösung oder Pyrogallussäure metallisches Silber aus-

geschieden werden, während an den nicht belichteten Stellen der Entwickler keine solche Reduction hervorruft. Soll daher an den letzteren Stellen durch eine spätere Lichtwirkung nicht auch eine ähnliche Wirkung hervorgebracht werden, so muss das noch unzersetzte Silbersalz entfernt werden. Dies geschieht durch ein Bad von Natriumthiosulfat oder Cyankalium, und damit sind dann die Umrisse der belichteten Stellen „fixiert". Helle Stellen des Bildes erscheinen infolge der eingetretenen Silberausscheidung dunkel und an den übrigen Stellen bleibt die Glasplatte mehr oder weniger durchsichtig. Dieses Bild, bei dem also Hell und Dunkel verwechselt auftreten, heißt ein „Negativ". Mit Hilfe desselben kann man dann ein „Positiv" herstellen, indem man es „copiert". Ein unter das Negativ gelegtes lichtempfindliches Papier wird nach der Entwicklung überall dort dunkel erscheinen, wo das Negativ durchsichtig geblieben ist, also dort, wo auch das ursprüngliche Lichtbild dunkle Stellen hatte.

Nach demselben Verfahren lassen sich auch Zeichnungen vervielfältigen, die auf gut durchsichtigem Pauspapier angefertigt werden, indem man sie auf lichtempfindliches Papier legt und nach der Belichtung die Copie in einem Bade fixiert.

Schon Davy hatte versucht, die Lichtempfindlichkeit der Silbersalze zu einer Fixierung der optischen Bilder zu benützen; seine diesbezüglichen Versuche scheiterten aber daran, dass er die nicht zersetzten Salze nicht zu entfernen vermochte. Im Jahre 1827 legte Josef Niepce die ersten auf Metallplatten hergestellten silhouettenartigen Bilder der „Royal Society" vor. Zum Zwecke der Ausnützung dieser seiner Erfindung verband sich Niepce mit dem Maler Daguerre, der das Verfahren wesentlich verbesserte, weshalb die Photographie anfangs nach diesem Daguerretypie genannt wurde. W. H. Talbot stellte die ersten Photographien auf Papier dar, wie sie jetzt durchwegs in Gebrauch sind. Man ist bereits nicht ohne Erfolg daran gegangen, nicht nur die Helligkeits-, sondern auch die Farbenunterschiede auf photographischem Wege zu reproducieren. Die Photographie ist für die verschiedensten Gebiete der Physik darum von hohem Werte, weil sie die oft mit Schwierigkeiten verbundene, directe Beobachtung vollständig zu ersetzen vermag. Die Beobachtung des Himmels und die Mikroskopie werden auf diesem Wege wesentlich erleichtert und verbessert.

Das noch dieser Familie, aber nicht derselben Gruppe angehörige Mangan kommt in der Natur als Braunstein oder Pyrolusit vor, der das Oxyd MnO_2 dieses Metalles ist. Der Braunstein findet, da er leicht Sauerstoff abgibt, in der Physik bei den constanten, galvanischen Elementen von Leclanchè und auch in der Chemie als Oxydationsmittel Verwendung. Auch das Kaliumpermanganat $KMnO_4$, das schon in geringen Mengen in Wasser gelöst, demselben eine schön violette Farbe gibt, wirkt im gleichen Sinne und wird daher in der Medicin als Desinfectionsmittel benützt.

Die letzte noch zu besprechende VIII. Familie umfasst nebst einigen seltenen und weniger wichtigen Elementen die Metalle: Eisen, Kobald, Nickel und Platin, also gerade die im stärkeren Maßstabe magnetisierbaren Metalle.

Das Eisen kommt auf der Erde nur in sehr geringen Mengen im metallischen Zustande vor, während die Meteorsteine oft ganz beträchtliche Massen fast reinen Eisens enthalten. Die wichtigsten Erze sind Rotheisenstein Fe_2O_3, Magneteisenstein Fe_3O_4, Brauneisenstein $Fe_4O_3(OH)_6$ und das Carbonat des Eisens, der Spateisenstein $FeCO_3$. Das Schwefelkies FeS_2 und das Magnetkies Fe_7S_8 eignen sich wenig zur Metallgewinnung, weil auch der geringste Schwefelgehalt das Eisen brüchig macht. Im Pflanzenreiche ist es ein unentbehrlicher Bestandtheil des Chlorophyls, und bei Menschen und Thieren tritt es im Blute auf. Aus den schwefelfreien Erzen wird das Eisen durch den Hochofenprocess gewonnen. Der Hochofen wird abwechselnd mit Erz- und Kohlenlagen „beschickt"; ein starker Luftstrom befördert im Feuer die Entwicklung von Kohlenoxydgas, das aber im Ofen nicht vollkommen zu Kohlensäure verbrennt, sondern theilweise als noch brennbares „Gichtgas" entweicht. In neuerer Zeit wird es in eigenen Maschinen zu motorischen Zwecken ausgenützt. Für die Qualität des Eisens ist hauptsächlich sein Kohlenstoffgehalt maßgebend. Das aus dem Hochofen abfließende Roh- oder Gusseisen enthält, abgesehen von anderen Verunreinigungen, 2—5% Kohlenstoff und etwas Phosphor.

Bei weniger als 1% Kohlenstoff wird das Eisen schweißbar, d. h. wenn zwei glühende Eisenstücke unter größerem Drucke oder durch Hämmern aneinandergepresst werden, so verbinden sie sich an dieser Stelle so innig und fest, wie ein einziges Stück. Dieser Vorgang des Schweißens erinnert an die Regelation des Eises, das sich ja auch mit einem anderen Eisstücke unter Druck vollständig vereinigen kann. Da diese Eigenschaft des Eisens umso mehr zum Vorschein kommt, je weniger Kohlenstoff es enthält, so sind die Entkohlungsmethoden für die Eisengewerke von größter Wichtigkeit.

Ein solches Verfahren ist der Bessemerprocess. Bei demselben wird ein kräftiger Luftstrom durch das flüssige Roheisen getrieben, wobei der Kohlenstoff verbrannt und der Phosphor zu P_2O_5 oxydiert wird. Die Phosphorsäure wird von der alkalisch reagierenden Cementmasse aufgenommen, mit der das Gefäß, die „Bessemerbirne" oder der „Converter", ausgefüttert ist und liefert das Material zur „Thomasschlacke", die als künstliches Düngemittel Verwendung findet. Je nach der Dauer des Processes und dem Grade der damit erreichten Entkohlung erhält man verschiedene Eisensorten.

Der Stahl steht an Kohlenstoffgehalt zwischen dem Guss- und Schmiedeeisen. Er kann daher aus letzterem auch durch „Kohlung oder Cementierung" gewonnen werden, indem man Eisenstäbe, in Kohle eingebettet, glüht, wobei das Eisen wieder Kohlenstoff aufnimmt. Der Stahl hat die Eigenschaft, dass er durch rasches und starkes Abkühlen sehr hart, aber auch spröde wird.

Das Eisen zeigt in verschiedenen Verbindungen verschiedene Wertigkeiten. Mit Schwefel bildet es das der Formel FeS entsprechende Schwefeleisen, während der Pyrit die chemische Formel FeS_2 besitzt. Im Schwefeleisen und Eisenvitriol $FeSO_4$ tritt es also zweiwertig, im Pyrit vierwertig auf.

Derartige zwei- und vierwertige Verbindungen bezeichnet man als Ferroverbindungen. Es gibt aber auch Verbindungen, in denen es bald drei-, bald sechswertig erscheint, und diese bezeichnet man dann als Ferriverbindungen, wie z. B. den Rost $Fe_2(OH)_6$.

Kobalt kommt mit Arsen im Speiskobalt $CoAs_2$ und mit Schwefel und Arsen im Glanzkobalt $CoS_2 . CoAs_2$ vor und tritt ebenfalls bald zwei-, bald dreiwertig auf. Es findet vielfach Anwendung in der Farbenbereitung. Sein Silicat, das unter dem Namen Schmalte bekannt ist, liefert eine sehr schöne, blaue Farbe, das Nitrat gibt mit Zinkoxyd geglüht, das Rinman'sche Grün.

Nickel tritt in Erzen meist an Arsen und Schwefel gebunden auf und wird aus dem Oxyde, welches aus den Erzen hergestellt wird, durch Reduction mittelst Kohle oder auch auf elektrolytischem Wege gewonnen. Wegen seiner Widerstandsfähigkeit gegen den Einfluss der Feuchtigkeit wird es oft dazu benützt, um eiserne Geräthe durch Vernickelung gegen Rostbildung zu schützen. Dabei wird eine Nickelplatte als Anode, Nickelsulfat $NiSO_4$ als Lösung und der zu vernickelnde Gegenstand als Kathode verwendet. Das reine Metall wird auch zur Münzung benützt.

Das Platin kommt in der Natur nur in geringen Mengen und wie das Gold fast nur im metallischen Zustande, wenn auch nicht vollkommen rein vor. Es ist dann meist mit Gold, Eisen und Kupfer und einigen anderen noch in diese Familie gehörigen selteneren Metallen vermischt. In Salpeter-, Schwefel- und Salzsäure ist es unlöslich wie das Gold, hat aber nicht die schöne Farbe und den Glanz wie die übrigen Edelmetalle. Wegen seiner Unlöslichkeit und seines hohen Schmelzpunktes eignet es sich sehr zur Herstellung von Apparaten für chemische und physikalische Untersuchungen.

Es ist auch wie das Gold in Königswasser löslich und bildet in demselben Platinchlorid $PtCl_4$. Im fein zertheilten Zustande vermag es als sogenannter Platinschwamm den Wasserstoff an seiner Oberfläche derart zu verdichten, dass er sich von selbst an der Luft entzündet; als „Platinmoor" wird es daher zur automatischen Entzündung des Wasserstoffes, wie z. B. bei der Döbereiner'schen Zündmaschine verwendet.

Organische Chemie.

Der Kohlenstoff besitzt in viel höherem Maße als die übrigen Elemente die Eigenschaft, seine Atome in mannigfachster Weise aneinander zu lagern, und bietet so Gelegenheit zur Enstehung zahlloser, sehr compliciert gebauter Verbindungen. Da ein großer Theil dieser Verbindungen dem Lebensprocesse der Pflanzen und Thiere entstammt und früher bei vielen irrthümlicherweise angenommen wurde, dass sie nur im lebenden Organismus entstehen könnten, wird jener Theil der Chemie, welcher sich mit den Kohlenstoffverbindungen befasst, als „organische Chemie" gesondert behandelt. Dabei pflegt man nur jene Verbindungen hieher zu zählen, welche neben Kohlenstoff auch Wasserstoff enthalten, während man Verbindungen wie die Metallcarbide, CO_2, CS_2 etc. zu den anorganischen rechnet.

Eine eigenthümliche Mittelstellung zwischen den Körpern der anorganischen und organischen Chemie nehmen die Kohlenstoff-Stickstoffverbindungen ein. Die Grund-

lage dieser Körperclasse bildet die ungesättigte Verbindung CN, sei es, dass wir den Stickstoff als dreiwertig auffassen $-C{\equiv}N$, oder ihn nach dem Schema $C{\equiv}N-$ als fünfwertig behandeln. Dieses Radical wird Cyan genannt und auch einfach wie ein Element mit Cy bezeichnet.

Die Elemente C und N verbinden sich unmittelbar miteinander, wenn man Stickstoff über ein rothglühendes Gemenge von Kohle und Pottasche leitet, wobei sich die Verbindung CNK, das Cyankalium bildet. Man erhält es auch, wenn man stickstoffhaltige, thierische Substanzen mit Pottasche glüht. Aus dem Kaliumcyanid gewinnt man dann durch Destillation mit verdünnten Säuren die Cyanwasserstoff- oder Blausäure $CN.H$ in wässeriger Lösung, die einen bittermandelartigen Geruch besitzt. Die Blausäure und ihre Verbindungen sind heftige Gifte. Diese Säure vermag die sonst unlöslichen Cyanide der Schwermetalle, insbesonders das Cyansilber und Cyangold zu lösen, und aus diesen Lösungen kann man wieder das Metall auf elektrolytische Wege ausscheiden. Durch Behandlung mit Cyankaliumlösungen wird auch das metallische Gold vom tauben Gesteine getrennt und dann aus dem Goldcyanur-Cyankalium gewonnen.

Werden thierische Abfälle, insbesondere Blut, mit Pottasche und Eisenfeilspänen geglüht, und wird hierauf die sich bildende Masse mit Wasser ausgelaugt, so scheidet sich aus der filtrierten und concentrierten Lösung das sogenannte, gelbe Blutlaugensalz oder Ferrocyankalium $K_4.Fe(CN)_6$ aus. Lösungen dieses Salzes geben mit Eisenoxydsalzen einen Niederschlag von prächtiger, blauer Farbe, den man als „Berliner- oder preußisch Blau" bezeichnet.

Als Ausgangspunkt der organischen Verbindungen kann das Sumpfgas oder Methan betrachtet werden $C\begin{smallmatrix}H\\H\\H\\H\end{smallmatrix}$. Das einwertige Radical, Methyl CH_3 verbindet sich mit Chlor, Jod oder Schwefelsäure zu Methylchlorid, beziehungsweise Methyljodid oder Methylsulfat. Dieses Radical kann sich aber auch mit einem zweiten Radical derselben Art verbinden, so dass wir einen Körper mit der Zusammensetzung $\begin{smallmatrix}H\\H\\H\end{smallmatrix}{>}C-C{<}\begin{smallmatrix}H\\H\\H\end{smallmatrix}$ erhalten, den man als Äthan bezeichnet. Wird abermals ein H-Atom durch das Radical CH_3 ersetzt, so erhalten wir das Propan: $CH_3.CH_2.CH_3$. Wenn wir noch eine solche Substitution an einem der Endglieder vornehmen, ergibt sich das Butan $CH_3.CH_2.CH_2.CH_3$ mit 4 C-Atomen, dann das Pentan mit 5 C-Atomen, das Hexan mit 6 u. s. w. Alle diese kettenförmig aufgebauten Kohlenwasserstoffe bezeichnet man nach ihren wichtigsten Vertretern als Paraffine oder als Kohlenwasserstoffe der Fettsäurereihe. Man bezeichnet sie als Petroleumreihe, weil die meisten derselben durch fractionierte Destillation aus dem amerikanischen Petroleum gewonnen werden können, da sie je nach ihrem Kohlenstoffgehalte bei verschiedenen Temperaturen verflüchtigt und wieder condensiert werden und sich so voneinander trennen lassen.

Die allgemeine Formel dieser bis zu 80 C-Atomen nachweisbaren Reihe ist $C_n H_{2n+2}$, da sie doppelt soviele H-Atome enthält als C-Atome und noch jedes Schlussglied durch je ein H-Atom gesättigt ist. Wenn aber zwei von diesen C-Atomen durch zwei Valenzen aneinander gebunden sind, so nimmt die Formel die Gestalt $C_n H_{2n}$ an, und man bezeichnet die Reihe als Olefine, beziehungsweise als Äthylen, Propylen, Butylen u. s. w. Wenn schließlich zwei C-Atome durch drei Valenzen aneinander gebunden sind und daher die allgemeine Formel $C_n H_{2n-2}$ lautet, so gelangen wir zur Acetylenreihe. Der einfachste Körper ist das Acetylen C_2H_2 oder Äthin, dann folgt das Propin, Butin u. s. w. Alle Olefine haben also die Eigenschaft, doppelt soviele H-Atome zu besitzen als C-Atome, auch wenn die Moleculargewichte verschieden sind; der Kohlenstoff macht daher immer $\frac{100.12}{12+2} = 85{\cdot}7\%$ und der Wasserstoff $\frac{100.2}{12+2} = 14{\cdot}3\%$ aus. Diese in der Chemie häufige Erscheinung bezeichnet man als Polymerie. Es kommt aber auch vor, dass nicht nur derselbe Procentgehalt, sondern auch dasselbe Moleculargewicht vorhanden ist und dennoch sowohl physikalische als auch chemische Verschiedenheiten vorliegen, die also nur in der verschiedenen Gruppierung der Atome ihren Grund haben können. In diesem Falle spricht man von Isomerie.

Bei der trockenen Destillation von Holz erhält man ein condensierbares Derivat des Methans, das nach der Formel $C\begin{smallmatrix}OH\\H\\H\\H\end{smallmatrix} = CH_3.OH$ zusammengesetzt ist, den so-

genannten Holzgeist oder Methylalkohol. In analoger Weise bezeichnet man alle Verbindungen, die aus den Kohlenwasserstoffen hervorgehen, indem ein H-Atom durch die Hydroxylgruppe OH ersetzt wird, als Alkohole. Werden zwei H-Atome durch Hydroxylgruppen ersetzt, so spricht man von zweiwertigen Alkoholen oder Glycolen, bei dreifacher Substitution von Glycerinen.

Wie der Holzgeist aus dem Methan hervorgeht, so lässt sich der bei der Destillation des Weines gewonnene, gewöhnliche Alkohol oder Weingeist aus dem Äthan ableiten. Da die zweiwertigen Alkohole nach der Gleichung: $H_2C\genfrac{}{}{0pt}{}{\diagup OH}{\diagdown OH} = H_2\,C.O + H_2\,O$ Wasser abspalten können, so bezeichnet man die entstehenden Körper, welche das Radical $-C\genfrac{}{}{0pt}{}{\diagup H}{=O}$ enthalten, als Aldehyde (Alkohol dehydrogenatus). Der aus dem Methan hervorgehende Formaldehyd wird z. B. als Desinfectionsmittel verwendet. Von der Aldehydgruppe unterscheidet sich die Carboxylgruppe $-C\genfrac{}{}{0pt}{}{\diagup OH}{=O} = -COOH$ nur in der Weise, dass das H-Atom derselben durch die Hydroxylgruppe ersetzt wird. Diese Gruppe bedingt den Säurecharakter einer organischen Verbindung.

Wird die freie Valenz dieser Gruppe mit H gesättigt, so stellt diese Formel die Zusammensetzung der Ameisensäure dar, so benannt, weil sie sich im Körper der Ameisen, wie auch in den Brennesseln und Fichtennadeln vorfindet. Die Essigsäure entspricht der Formel $CH_3 - COOH$, die Palmitinsäure ist $C_{15}H_{31} - COOH$ und die Stearinsäure $C_{17}H_{35} - COOH$.

Wie in der anorganischen Chemie, so gehen auch hier aus den Säuren Salze hervor, wenn das H-Atom der Hydroxylgruppe durch Metalle ersetzt wird. So erhält man durch Auflösen von Bleioxyd PbO in Essigsäure das Bleiacetat oder den Bleizucker $Pb\,(CH_3 - COOH)_2 + 3\,H_2O$.

Denken wir uns in einem Alkohol das H-Atom der Hydroxylgruppe durch das Radical eines Kohlenwasserstoffes ersetzt, sodass also z. B. die beiden Radicale in $C_2H_5 - O - C_2H_5$ durch ein O-Atom miteinander verbunden sind, so nennt man eine solche Verbindung einen Äther. Der sogenannte Schwefeläther, welcher dieser Formel entspricht, erhielt diesen seinen Namen, weil man ihn durch Erhitzen von Äthylalkohol mit Schwefelsäure gewinnt, indem letztere das nach der Formel:

$$2\,(C_2H_5.OH) = (C_2H_5 - O - C_2H_5) + H_2O$$

freiwerdende Wassermolecül in sich aufnimmt. Bindet das O-Atom zwei verschiedene Radicale, so ist es ein zusammengesetzter Äther. Wenn wir für das H-Atom der Hydroxylgruppe ein Säureradical einführen, so erhalten wir Säure-Ester. So kann man aus dem Glycerin $(CH_2.OH)\,(CH.OH)\,(CH_2.OH)$ die Verbindung:

$$(CH_2.O.NO_2)\,(CH.O.NO_2)\,(CH_2.O.NO_2)$$

ableiten, indem man für H die sogenannte Nitrogruppe einsetzt, und dadurch erhalten wir die Formel des bekannten Sprengmittels „Nitroglycerin", aus welchem durch Beimischung von Kieselguhr „Dynamit" hergestellt wird.

Die festen Fette enthalten hauptsächlich Palmitin- und Stearinsäure, die flüssigen die etwas abweichend gebaute Ölsäure, an Glycerin gebunden. Werden die Fette mit einem starken Alkali verkocht, so verdrängt dasselbe den schwächeren, basischen Bestandtheil, das Glycerin wird frei und es entstehen Alkaliverbindungen der fetten Säuren, nämlich die Seifen. Die halbfeste Schmierseife enthält als basischen Bestandtheil Kalium und wird durch Verkochen von Fetten mit „Seifensiederlauge" gewonnen. Durch Zusatz von Kochsalz scheidet sich aus der Lösung die harte Natronseife als Kernseife ab, und das Glycerin wird mit der Mutterlauge entfernt.

Die Kohlenhydrate. Ersetzen wir im Hexan $CH_3 - (CH_2)_4 - CH_3$ bei jedem C-Atom ein H-Atom durch die Hydroxylgruppe, so erhalten wir den betreffenden Alkohol $CH_2.OH - (CH.OH)_4 - CH_2.OH$, und aus diesem können wir verschiedene Aldehyde ableiten, jenachdem die Aldehydgruppe an einem Endgliede oder in der Mitte der Kette eingeschaltet wird; so erhalten wir $CH_2.OH - (CH.OH)_4 - C\genfrac{}{}{0pt}{}{\diagup H}{=O}$ oder $CH_2.OH - (CH.OH)_3 - CO - CH_2.OH$. Beide sind also isomere Verbin-

dungen, die der Formel $C_6 H_{12} O_6$ entsprechen und H und O in demselben Verhältnisse wie das Wasser, und so viel C- als O-Atome enthalten.

Die zuerst angeführte Gruppierung besitzt der Traubenzucker und andere ähnliche Zuckerarten, sie heißen Aldehydzucker oder Aldosen; der sogenannte Fruchtzucker hat die zuletzt angeführte Atomgruppierung und wird daher den Ketonen beigezählt. Der Rohrzucker, Milchzucker, Malzzucker und andere Zuckerarten entsprechen der Formel $C_{12} H_{22} O_{11}$, und es fehlt ihnen also nur die Atomgruppe $H_2 O$, um in zwei der früher angeführten Verbindungen zerfallen zu können, wie es beim Aufkochen mit verdünnten Säuren oder durch Fermente unter Aufnahme von Wasser thatsächlich geschieht. Dadurch zerfallen diese „Disaccharide" oder ähnlich aufgebaute „Polysaccharide" in zwei oder mehrere „Monosaccharide"; diese Spaltung bezeichnet man als „Invertieren", und und die Fermente, welche sie hervorrufen, „Invertasen".

Die Herstellung des in den Handel kommenden Zuckers bildet einen großen Industriezweig. Der aus dem Zuckerrohre oder aus der Runkelrübe gepresste Saft wird, um ihn von anderen Beimengungen, besonders von den eiweißhaltigen Substanzen zu reinigen, mit Kalkhydrat verkocht und dieses dann durch Einleiten von Kohlensäure gefällt. Die so erhaltene Lösung wird hierauf durch Knochenkohle filtriert und im Vacuumapparate concentriert. Nach dem Erkalten wird der krystallinisch ausgeschiedene Zucker (Moscovade) von der nicht krystallisierten „Melasse" getrennt und neuerlich durch Lösung und Filtrierung gereinigt.

Der reine Zucker löst sich in kaltem Wasser ungefähr bis zum dritten Theile und in siedendem Wasser in jedem Verhältnis, während er in Alkohol und Äther unlöslich ist. Der in großen Krystallen ausgeschiedene Candiszucker schmilzt bei 160° C und erstarrt dann zu einer amorphen, glasartigen Masse, dem sogenannten Gerstenzucker. Nach einer Erwärmung über 220° C verwandelt er sich unter Wasserverlust in den braunen Caramelzucker.

Die wichtigsten Polysaccharide sind die Stärke, Cellulose, die Dextrine, Glycogene, arabisches Gummi, Pflanzenschleime und dergleichen. Die Stärke kommt in Gestalt mikroskopischer Körnchen von organisierter Structur fast in allen Pflanzen vor, besonders im Stamme, in den Wurzelknollen und Samen. Sie wird aus Kartoffeln, Reis und Getreide fabriksmäßig gewonnen. Im Wasser gekocht quillt sie auf und bildet dann den Stärkekleister. Durch Inversion geht sie in Dextrin und Malzzucker über. Der Stärke einigermaßen ähnlich ist das im Thierkörper, besonders in der Leber vorkommende Glycogen.

Die Zellwände der Pflanzen, die Holzfasern u. s. w. bestehen größtentheils aus Cellulose, die im Wasser unlöslich und schwer invertierbar ist. Wie das Glycerin mit Salpetersäure Nitroglycerin liefert, so lassen sich auch aus den Zuckerarten Nitrate ableiten, wie z. B. die Nitrocellulose oder Schießbaumwolle (Pyroxylin). Sie ist ein vielverwendetes Sprengmittel und bildet den Hauptbestandtheil der rauchschwachen Schießpulver. In Alkoholäther gelöst liefert sie das in der Medicin vielfach verwendete Collodium.

Die Gährung. Durch den Lebensprocess der Hefepilze gehen die Monosaccharide sehr leicht in Kohlensäure und Alkohol über: $C_6 H_{12} O_6 = 2 C_2 H_6 O + 2 CO_2$, und diesen Übergang bezeichnet man als Gährung. Disaccharide und Polysaccharide müssen zuerst durch Fermente invertiert werden, um gähren zu können. Das „Quellen, Keimen und Darren" des Gerstenkornes und das „Einmaischen" des gewonnenen Malzes bei der Bereitung des Bieres hat nur diesen Zweck, da sich dabei die „Diastase" bildet und invertierend wirkt.

Die so erhaltene „Würze" wird dann, mit $^1/_2$—$1^1/_2$ kg Hopfen pro hl Malz versetzt, in der Braupfanne verkocht, worauf sich die gerinnenden Eiweißkörper ausscheiden, und jetzt kann erst die filtrierte Lösung durch Hefe zum Gähren gebracht werden. Hierauf wird das Jungbier zur Nachgährung in die großen Lagerfässer gegeben und während der später noch auftretenden „stillen" Gährung genossen; die im Biere gelöste Kohlensäure bewirkt das Moussieren desselben.

Bei der Bereitung des Weines entfällt die Arbeit des Malzens und Maischens, weil der Traubensaft schon fertiggebildete gährungsfähige Zuckerarten enthält. Alkohol, Cognac, Brantwein und Spiritus werden durch Destillation vergohrener Flüssigkeiten hergestellt.

Aromatische Körper. Das aus dem Steinkohlentheer gewonnene Benzol oder Steinkohlenbenzin hat die Zusammensetzung $C_6 H_6$, und da wir diese Verbindung als eine gesättigte ansehen müssen, so folgt, dass von jedem C-Atom nur eine Valenz

zur Bindung eines H-Atomes verwendet wird, während die drei übrigen Valenzen durc
die C-Atome gegenseitig gebunden werden; dieselben können also nicht kettenartig unter
einander verbunden sein, sondern sie müssen wie die Ecken eines Tetraeders nach j
drei Richtungen zusammenhängen. Wenn wir hier wieder ein H-Atom durch die Hydroxyl
gruppe ersetzen, so erhalten wir als Analogon der Alkohole die Phenole; eines de
wichtigsten und bekanntesten ist die Carbolsäure $C_6H_5 . OH$. Wenn wir statt de
Hydroxylgruppe das Ammoniakradical NH_2 einführen, so erhalten wir das für di
Farbenindustrie wichtige Anilin $C_6H_5 . NH_2$. Werden drei H-Atome des Benzols durc
die Nitrogruppe NO_2 ersetzt, so erhalten wir wieder ein Sprengmittel, die Pikrinsäur
$C_6H_3 . (NO_2)$. Durch die Aneinandergliederung zweier Benzolringe erhalten wir noc
complicierter aufgebaute Atomgruppen von C und H, wie z. B. das Naphtalin $C_{10}H_8$ u. s. w

Alkaloide. Die zuletzt angeführten Körper bilden gewissermaßen die Mutter
substanzen der Alkaloide, so genannt, weil sie alkalische Eigenschaften zeigen. Si
sind durchwegs auch stickstoffhältig und entweder sehr giftig oder Arzneimittel. Hiehe
gehört das fiebervertreibende Chinin $C_{20}H_{24}N_2O_2$, das schlaferzeugende Morphin $C_{17}H_{19}NO$
und die verschiedenen Opiumarten, das empfindungslähmende Cocaïn $C_{17}H_{21}NO_4$, da
Atropin der Tollkirche $C_{17}H_{23}NO_3$, das höchstgiftige Strychnin $C_{21}H_{22}N_2O_2$, das lähmend
Pfeilgift Curarin $C_{10}H_{21}NO_4$, das Coniin des Schirlings $C_8H_{17}N$, das Nicotin des Tabak
$C_{10}H_{14}N_2$ u. a.

Eiweißkörper (Albumine). In den Organismen der Pflanzen und Thier
finden sich noch eine Reihe von stickstoffhaltigen Substanzen mit sehr complicierten
Bau, dessen nähere Beschaffenheit uns noch vielfach unbekannt ist. Ihren Namen er
hielten sie nach dem Weißen im Hühnerei, in welchem die Eiweißkörper in besondere
Menge und Reinheit vorkommen. Sie enthalten 50—55% Kohlenstoff, 6—7% Wasserstoff
15—18% Stickstoff, 21—23·5% Sauerstoff und 0·3—2% Schwefel. Im Brunnenwasse
sind sie meist löslich, in Alkohol und Äther dagegen unlöslich. Beim trockenen Erhitzer
verbreiten sie den Geruch nach verbranntem Horn. Wie das Weiße des Hühnereie
werden sie beim Kochen unlöslich und coagulieren. Diese Erscheinung tritt aber auc
ohne Erhitzung durch die Einwirkung von Fermenten ein, und darauf beruht da
Gerinnen des aus den Adern entfernten Blutes und das Eintreten der Todesstarre in de
Muskeln. Durch die Einwirkung von Säuren, Alkalien und mancher im Magen un
Darm der Thiere vorkommenden Fermente verlieren sie die Eigenschaft zu coaguliere
und liefern dann leicht diffundierende und resorbierbare Körper, die Albumosen un
Peptone, die zur Aufsaugung durch den Darm und darum zur Ernährung sehr geeigne
sind. Eine bestimmte Menge von Eiweißkörpern muß jeder thierische Organismus i
sich aufnehmen, um sich zu erhalten. Das Muskelfleisch, das Blut und andere Organ
der Thiere, sowie auch die Samen der Pflanzen, in welchen große Eiweißmengen auf
gestapelt sind, bilden daher die besten Nahrungsmittel. Außer C, H, N, O und S trit
im rothen Blutfarbstoff der Wirbelthiere, dem Hämoglobin, noch Eisen, im Blutfarbstof
mancher niederer Thiere auch Kupfer auf. Die besonders in den Zellkernen vorkommen
den Nucleïne sind phosphorhältig. Auch der wichtigste Eiweißkörper der Milch, da
Kaseïn, enthält Phosphor. Wenn dasselbe durch das im Magen, sowie auch i
manchen Pflanzen vorkommende „Lab" beim Gerinnen unlöslich gemacht wird, s
lässt es sich von der ablaufenden, süßen Molke trennen und einer langsamen Gährun
— Reifung — zuführen. Die so hergestellten „fetten Käse" enthalten noch alle
Fett, welches in Form feinster Kügelchen der Milch die weiße Farbe gibt. Der noc
zurückbleibende Milchzucker geht dabei in Gährung über, und die Kohlensäure, di
sich dabei entwickelt, erzeugt die im Käse oft vorkommenden Löcher und Hohl
räume. Die mageren Käsearten werden aus der „abgerahmten" Milch hergestellt un
kommen durch die Selbstsäuerung der Milch zustande. Wird die Milch in geschlossene
Gefäßen erhitzt (pasteurisiert), so werden die Bacterienkeime, welche sonst den Milch
zucker in Milchsäure überführen, unschädlich gemacht (Sterilisierung) und vor den
Gerinnen auf längere Zeit geschützt.

Der Pflanzenkäsestoff oder das Legumin findet sich in größeren Mengen besonder
in den Hülsenfrüchten. Man gewinnt es aus denselben durch Ausziehen mit salzhaltige
Wasser und fällt dann den Käsestoff aus der filtrierten Lösung durch Essigsäure.

Die Fibrine treten als Blut-, Muskel- und Pflanzenfibrin auf. Ersteres bildet sic
im gerinnenden Blute und verursacht die Starrheit des vom Serum getrennten Blut
kuchens. Das Muskelfibrin bildet den Hauptbestandtheil des Fleisches. Wird da
frische Fleisch in kaltes Wasser gegeben und dieses dann allmählig bis zum Siede
erwärmt, so wird ein Theil der löslichen Eisweißstoffe dem Fleisch entzogen, geht i
Lösung und scheidet sich aus der Fleischbrühe beim Kochen als unlöslicher Schaum

ab, der entfernt wird. Beim Einbringen in kochendes Wasser oder beim Braten des Fleisches findet dieser Verlust nicht statt.

Das Pflanzenfibrin oder der Kleber, wie er speciell in den Samen unserer Getreidearten vorkommt, bedingt zugleich mit der Stärke den Nährwert unserer Mehlfrüchte.

Um die in den Samen der Getreidearten vorhandenen Nahrungsstoffe verdaulicher zu machen, wird das zu Mehl zerriebene Korn mit Wasser zu einem Teig geknetet und demselben Hefe oder Sauerteig, d. h. ein bereits in Gährung befindlicher Teig zugesetzt, wodurch die Stärke zuerst in die verschiedenen Zuckerarten übergeht, die dann wieder in Alkohol und Kohlensäure zerfallen. Die sich dabei entwickelnde Kohlensäure bewirkt, dass der Teig „aufgeht“. Die Gährung wird dann in dem bis auf ungefähr 200° C erwärmten Ofen unterbrochen und dabei das Gährungsmittel zerstört. Dabei erhält die gelockerte Brotmasse eine stark dextrinhältige Rinde, die das Brot vor dem raschen Vertrocknen schützt. Die verschiedenen Zwiebackarten werden nicht angesäuert und sind härter, aber viel haltbarer als das Brot.

Albuminoide sind eiweißähnliche Körper, die sich in verschiedenen thierischen Organen finden, wie in den Knochen, in der Haut, in den Haaren, Bindegeweben und besonders auch in den Gerüsten niederer Thiere, wie der Käfer, Krebse u. s. w. Die Bindegewebe enthalten z. B. das Collagen, welches beim Kochen mit Wasser eine lösliche, beim Erkalten aber erstarrende Modification bilden, nämlich die Gelatine oder den Leim. Es kommt auch in der Haut der Thiere vor, die durch langes Aufkochen Leim liefert. Durch Behandlung mit den sogenannten Gerbstoffen, z. B. Lohe, d. i. Rinde von Eichen und Fichten, Birken, mit Galläpfeln und ähnlichen Stoffen verbindet sich das Collagen der Haut mit dem Gerbstoff, und dadurch geht die Haut in Leder über. Das Leder bleibt an der Luft geschmeidig, weil seine Fasern beim Eintrocknen nicht zusammenkleben, und es widersteht auch dem Einflusse des kochenden Wassers und der zersetzenden Wirkung der Fäulnis. Wie die Gerbsäure, so verbinden sich auch Metallsalze, besonders der Alaun mit dem Collagen der Häute. So wird durch Behandlung von Schaf- und Ziegenfellen mit Alaun und Kochsalz in der Weißgerberei das Glacéleder hergestellt. Die Gerberei mit Fetten, besonders mit Thran, liefert das weiche gelbe Waschleder (Sämisch-Gerberei).

———o———

Magnetismus und Elektricität.

Magnetismus.

Einzelne Stücke des aus Ferroferrioxyd ($Fe\,O\,.\,Fe_2\,O_3$) bestehenden Magneteisensteines haben von Natur aus die Eigenschaft, an einzelnen Stellen Eisenfeilspäne anzuziehen und festzuhalten. Man bezeichnet daher dieselben als natürliche Magnete. Dieselbe Eigenschaft zeigen auch, besonders nach längerem Gebrauche, stählerne Werkzeuge. Die künstlichen Magnete werden je nach ihrer Bestimmung entweder als

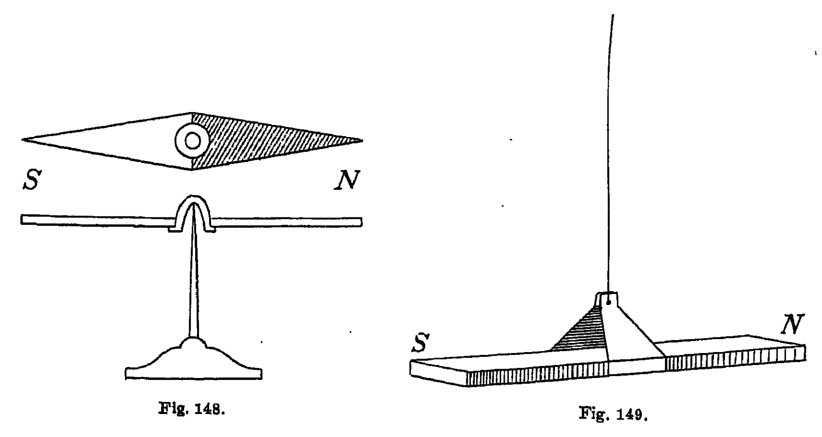


Fig. 148. Fig. 149.

Magnetnadel (Fig. 148), als Magnetstäbe (Fig. 149) oder als Hufeisenmagnete (Fig. 150) hergestellt und bestehen aus hartem Stahl.

Diese Magnete haben folgende charakteristische Eigenschaften:

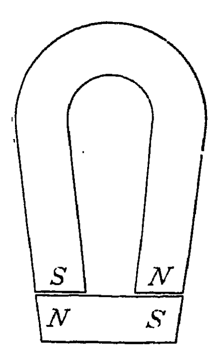


Fig. 150.

1. In größeren Entfernungen von anderen Eisenmassen orientieren sie sich nach einer ganz bestimmten Weltgegend, und zwar kehren sie in unseren Gegenden das eine Ende ungefähr gegen Norden, das andere gegen Süden.

2 Wenn man zwei Magnetnadeln einander nähert, so stoßen sich die nach derselben Richtung weisenden Enden gegenseitig ab, und die nach entgegengesetzten Weltgegenden gerichteten ziehen sich an.

3. Je näher man eine Magnetnadel einem größeren Magnete bringt, desto rascher schwingt sie um ihre Ruhelage.

4. Wenn man die sich anziehenden Enden miteinander in Berührung bringt, so halten sie sich mit einer bestimmten Kraft fest.

5. Ein Magnetstab zieht nicht nur andere Magnete, sondern auch unmagnetisches, weiches Eisen an, aber nicht an allen Stellen. Gibt man einen Magnetstab in Eisenfeilspäne, so bleiben dieselben an den Enden, den Polen, in relativ großer Menge, in der Mitte dagegen gar nicht haften. Denjenigen Pol, welcher beim freischwebenden Magnete nach Norden weist, bezeichnet man als Nordpol des Magneten, den anderen als seinen Südpol.

Wenn wir die eine Spitze einer stählernen Stricknadel einer freibeweglichen Magnetnadel nähern, und übt sie auf beide Pole derselben eine anziehende Wirkung aus, so wissen wir, dass die Nadel selbst noch kein Magnet ist, denn sonst würde sie nur einen Pol anziehen. Wenn wir sie aber, in der Mitte festhaltend, mit dem einen Ende am einen Pol eines größeren Magneten streichen und hierauf mit dem anderen Ende am zweiten Pol, so wird sie magnetisch und zieht nur mehr einen Pol der Magnetnadel an, während sie den anderen abstößt. Auch nimmt sie dann, freibeweglich aufgehängt, dieselbe Richtung im Raume an, wie jeder andere Magnet, und die büschelförmig an den Enden sich ansetzenden Eisenfeilspäne zeigen, dass sich zwei Pole gebildet haben, die früher nicht vorhanden waren. Brechen wir eine solche Nadel in der Mitte ab, und geben wir die beiden Stücke wieder in Eisenfeilspäne, so sehen wir, dass sich ohne weitere Magnetisierung abermals zwei Pole gebildet haben, und zwar gerade dort, wo sich früher kein Magnetismus gezeigt hat. Jeder Theil erweist sich wieder als Magnet mit seinem eigenen Nord- und Südpol, und zwar sind beide Nordpole nach derselben Seite gerichtet, wie vor dem Zerbrechen. Genau dieselbe Erscheinung zeigt sich, wenn wir jedes Stück noch einmal in zwei oder auch in mehrere Stücke zerbrechen. Wir schließen daraus, dass wir so immer neue Magnete erhalten würden, so weit wir auch die Theilung fortsetzen mögen. Die kleinsten Theile, die noch Magnetismus zeigen würden, nennt man dann Elementarmagnete (Fig. 151).

Fig. 151.

Die ganze Umgebung eines Magneten, so weit sich seine magnetischen Wirkungen nachweisen lassen, nennt man sein magnetisches Feld.

Der französische Physiker Coulomb hat auch (1785) das Gesetz aufgestellt, nach dem die Intensität des magnetischen Feldes zu- und abnimmt. Die Schwingungsdauer T einer Magnetnadel, die sich in der Nähe eines Magnetpoles befindet, hängt nach der Gleichung $T = 2\pi \sqrt{\frac{K}{D}}$ nur vom Trägheitsmoment K und vom Drehmomente D ab, mit der die Nadel ihre Richtung erhält. Stellen wir die Magnetnadel so, dass ihre Achse auf der Richtung der magnetischen Kraft senkrecht steht, so ist dieses Moment $D = p \,.\, l$, wenn p die Stärke der Richtkraft und l die Länge der Magnetnadel ist. Wir nennen es das magnetische Moment der Nadel. Man kann dasselbe auch finden, indem man in der Entfernung r vom Drehungspunkt einen Seidenfaden befestigt und letzteren an die Zunge einer Präcisionswage heftet. Der durch Belastung einer Wagschale gefundene Zug z gibt dann, mit dem Abstand r multipliciert, das magnetische Moment $z r = D = p l$ und es ist $p = \frac{D}{l}$.

Diese Richtkraft ist also $p = \frac{4\pi^2 K}{l T^2} = \frac{4\pi^2 K}{l} \,.\, n^2$, wenn $n = \frac{1}{T}$ die Schwingungszahl bedeutet. Eine sehr kleine Magnetnadel mache, wenn kein anderer

Magnet in der Nähe ist, n Schwingungen in der Secunde. Sie befindet sich also auch dann in einem magnetischen Felde, wenn alles Eisen von ihr fern gehalten wird. Wir schreiben diese Wirkung dem „erdmagnetischen Felde" zu, dessen Eigenschaften wir später noch genauer kennen lernen werden. Lassen wir hierauf die Nadel in nächster Nähe eines sehr langen, stabförmigen Magneten schwingen, so wird sich eine andere Schwingungszahl n_1 einstellen, wenn die Entfernung vom Pole gleich d_1 ist. Die Kraft, welche diese Schwingungen hervorruft, stammt aber nicht ausschließlich vom Magnete, sondern auch vom erdmagnetischen Felde. Bezeichnen wir die Kräfte, die in beiden Fällen auf die Magnetnadel wirken, mit p und p_1, so ist nur die Differenz $p_1 - p$ auf die Wirkung des Magnetpoles zurückzuführen, und diese können wir nun nach der Formel $p_1 - p = \frac{4\pi^2 K}{l}(n_1^2 - n^2)$ berechnen. Wählen wir ferner eine andere Distanz d_2 und bestimmen wir für dieselbe die Schwingungszahl n_2, so ist in diesem zweiten Falle die Wirkung des Poles $p_2 - p = \frac{4\pi^2 K}{l}(n_2^2 - n^2)$, und diese beiden Wirkungen verhalten sich also $(p_1 - p) : (p_2 - p) = (n_1^2 - n^2) : (n_2^2 - n^2)$.

Es stellt sich heraus, dass die magnetische Kraft in der doppelten Distanz nur mehr halb so groß und, allgemein gesprochen, verkehrt proportional ist dem Quadrate der Entfernung. Dieses Gesetz der Wirkungsweise der magnetischen Kräfte oder, wie wir auch sagen können, der Intensität des magnetischen Feldes wird als das Coulomb'sche Gesetz bezeichnet. Man kann es experimentell auch mit Hilfe der Coulomb'schen Drehwage nachweisen. (Fig. 152.) An dem um A drehbaren Torsionskopfe ist mittels eines Silberdrahtes der Magnetstab ns leicht beweglich aufgehängt. Jede Drehung des Magnetstabes ist aber mit einer Torsion des Drahtes verbunden, und dieser trachtet vermöge seiner Elasticität den Stab in jene Lage zu bringen, bei welcher er keine Drehung erfährt. Stellen wir nun dem Nordpole n dieses Magneten den Nordpol eines anderen Magnetstabes $n's'$ nahe gegenüber, so wird ersterer abgestoßen und nimmt die Lage OC ein. Der Drehungswinkel ist also $BOC = \alpha$;

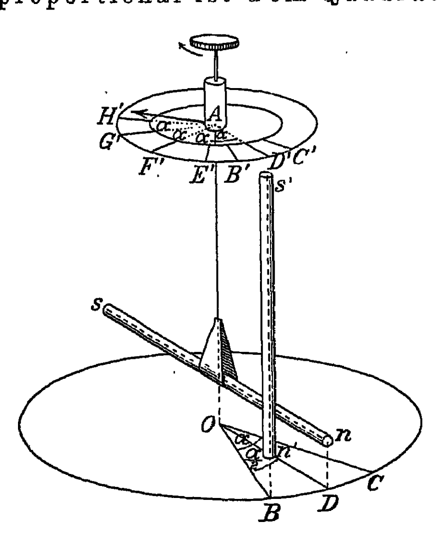


Fig. 152.

um diesen Ausschlagswinkel bis auf die Hälfte herabzudrücken, müssen wir den Torsionskopf von AB' so weit gegen AH' drehen, bis der Zeiger mit der neuen Stellung des Magnetstabes OD den Winkel $D'AH' = 4\alpha$ einschließt. Da aber die Torsionskraft dem Torsionswinkel proportional ist, so muss auch die abstoßende Kraft in der halben Entfernung viermal so groß sein.

Um uns von der Vertheilung der magnetischen Kräfte ein anschauliches Bild zu verschaffen, bedienen wir uns der folgenden Versuche. Legt man auf einen Magnet ein Blatt Papier und streut darauf aus einiger Entfernung sehr fein zertheiltes Eisen (Limatura ferri), so ordnen sich die Eisentheilchen zu Linien, die an jeder Stelle diejenige Richtung haben, welche hier eine sehr kleine Magnetnadel einnehmen würde. Man bezeichnet sie als magnetische Kraftlinien. Sie geben uns aber nicht nur die Richtung, sondern auch die Stärke der Kraft an, da dieselbe um so mehr zu-

nimmt, je mehr solcher Kraftlinien auf jeden cm^2 entfallen. So sehen wir aus Fig. 153, wie in der Nähe der Pole die Kraftlinien sich strahlenförmig ausbreiten, beziehungsweise vereinigen, während sie sich in der Symmetrie-

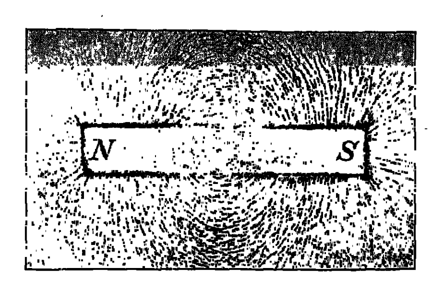


Fig. 153.

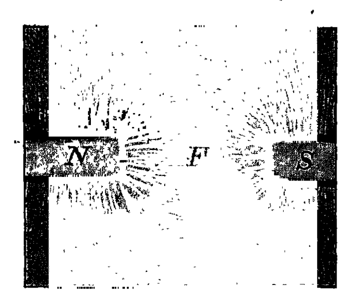


Fig. 154.

ebene am stärksten zerstreuen. Die gegen die Pole hin convergierenden Linien schneiden sich aber gegen das Innere des Magneten verlängert nicht genau in einem Punkte, und darum darf man sich den Pol auch nicht als einen mathematischen Punkt vorstellen; bei der Bestimmung der Pole handelt es sich also nur darum, von welchem Punkte alle magnetischen Kräfte ausgehen müssten, um dieselben Wirkungen auszuüben. Im Innern des Magneten kommt eine derartige Vereinigung der Kraftlinien überhaupt nicht zustande.

Wenn an einer Stelle des magnetischen Feldes die Kraftlinien parallel verlaufen, wie in Fig. 154 in der Mitte, so nimmt die Feldintensität nach keiner Richtung hin zu, und auch die Richtung der magnetischen Kraft ändert sich nicht; wir sagen, das magnetische Feld sei an dieser Stelle homogen. Geben wir ein Stück weiches Eisen in dieses homogene Feld, so bemerken wir, wie dasselbe die Kraftlinien in größerer Anzahl in sich zu vereinigen sucht. Wie also nach Fig. 155 die Kraftlinien des Magneten beim

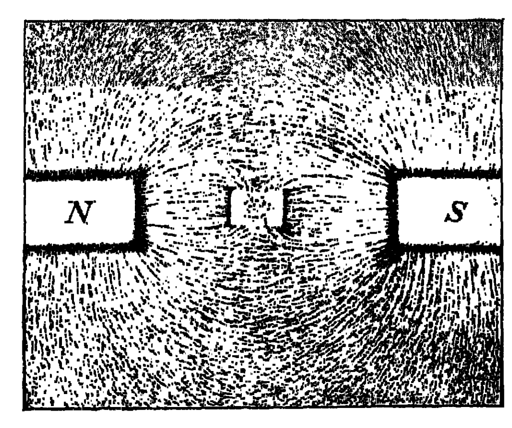


Fig. 155.

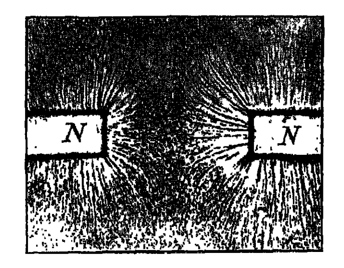


Fig. 156.

einen Pol eintreten und beim anderen austreten, so geschieht es hier auch bei diesem Eisenstücke, es nimmt einen Nordpol und einen Südpol an, weil sich die verlängerten Kraftlinien in zwei Punkten zu treffen scheinen. Stellen wir zwei gleichnamige Pole einander gegenüber (Fig. 156), so weichen sich die Kraftlinien aus.

Wir nehmen nun ganz willkürlich an, dass die Kraftlinien vom Nordpol ausgehen, durch die Luft zum Südpol ziehen und durch den Magnet zum Nordpol zurückkehren.

Permanente und temporäre Magnete. Während die künstlichen Magnete, die wir bisher untersucht haben, immer von einem magnetischen Felde umgeben sind, ist dies bei einem Stück weichen Eisens nicht der Fall. Wenn wir es aber in ein magnetisches Feld geben, oder wenn wir es mit einem Magnete in Berührung bringen, so erhält es ebenfalls alle Eigenschaften eines Magneten. Das ergibt sich nicht nur daraus, dass die Kraftlinien im magnetischen Felde in das Eisenstück ein- und dann wieder austreten wie bei einem Magneten, sondern es lässt sich auch noch durch folgenden Versuch zeigen. Wenn man ein Stück weiches Eisen mit dem Magneten in Berührung bringt, so vermag es noch ein zweites Stück Eisen anzuziehen, die Magnetnadel abzulenken und zeigt am freien Ende denselben Magnetismus wie der Pol, mit dem es in Berührung steht. Im Gegensatz zu einem solchen nur zeitweilig auftretenden Magnetismus, bezeichnet man demnach einen aus Stahl bestehenden Magnet als einen permanenten und das weiche Eisenstück als einen temporären Magneten. Ersterer ist der Sitz einer Kraft, welche Arbeit zu leisten vermag, um dagegen letzteren magnetisch zu machen, muss erst eine Arbeit geleistet werden, und diese Magnetisierungsarbeit nennt man magnetische Induction. Bringt man ein Stück Holz in das magnetische Feld oder mit dem Magnetpol in Berührung, so wird es dabei nicht magnetisch, und die Kraftlinien erleiden auch keine Verschiebung; sie wirken durch das Holz und durch alle unmagnetischen Körper hindurch wie durch die Luft. Da aber die Kraftlinien durch das Eisen viel leichter und in viel größerer Anzahl hindurchgehen, so sagt man, es sei für die Kraftlinien im höheren Grade durchlässig oder permeabel. Das weiche Eisen ist sogar stärker permeabel als der Stahl; letzterer setzt nämlich der Magnetisierung einen gewissen Widerstand entgegen, den man als Coërcitivkraft bezeichnet.

Magnetisierung des Stahles. Eine Magnetisierung des Stahles tritt schon ein, wenn man ihn mit einem Magneten in Berührung bringt; infolge der Coërcitivkraft wird er aber nur wenig magnetisch. Die Wirkung kann jedoch dadurch wesentlich gesteigert werden, dass man den Stahl seiner ganzen Länge nach mit einem Magnetpol „streicht“. Wenn man eine magnetisierte Stricknadel in viele gleichlange Stücke zerbricht und die magnetischen Kräfte der einzelnen Theile genauer untersucht, so zeigt sich, dass gerade die aus der Mitte genommenen Theile die stärksten sind, obwohl sich hier der Magnetismus weniger zeigte als an den Polen. Um durch den „Strich“ möglichst starke Magnete herzustellen, legt man daher den Stahlstab ns (Fig. 157) zwischen die ungleichnamigen Pole zweier Magnete N und S und streicht dann, ebenfalls mit den ungleichnamigen Polen N' und S' zweier anderer Magnete, in der Mitte beginnend und in der Mitte wieder absetzend, ziemlich oft hin und her. Damit sich dabei die Magnete N' und S' nicht berühren, trennt man sie durch ein Stückchen Holz.

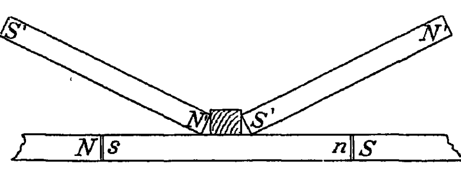


Fig. 157.

Eine wirksamere Magnetisierung lässt sich mit Hilfe des elektrischen Stromes erzielen und zwar nicht nur beim Stahl, sondern auch beim weichen Eisen; im letzteren Falle erhält man sogar die stärksten, wenn auch nur temporäre Magnete.

Die Stärke des Magnetismus. Wenn man eine Magnetnadel in verschiedenen Entfernungen eines starken Magnetpoles schwingen lässt, so wird ihre Schwingungszahl um so größer, je geringer ihre Entfernung vom

Pole, also je stärker das magnetische Feld ist. Die Schwingungszahl nimmt aber auch zu, wenn wir die Nadel stärker magnetisieren. Die Schwingungszahl hängt somit nicht nur von der Stärke des Feldes, sondern auch von der Stärke des schwingenden Magneten ab, und die Kraft p, welche die Schwingungen hervorruft, entspricht daher dem Producte $p = mH$ der Intensität H des magnetischen Feldes und der Stärke m der Magnetpole.

Wir können zwar aus dem Trägheitsmomente K der Nadel und aus der Schwingungszahl wohl das Product p, aber noch nicht die einzelnen Factoren m und H bestimmen.

Zusammensetzung magnetischer Felder. Dass jede frei bewegliche Magnetnadel mit der einen Spitze nach Norden und mit der anderen nach Süden weist, und dass sie, aus dieser Lage gebracht, um dieselbe Schwingungen ausführt, das beweist uns also, dass wir uns auf der Erdoberfläche in einem magnetischen Felde von ganz bestimmter Stärke befinden. Wenn ferner auf diese Nadel noch ein Magnet durch das ihn umgebende Feld einwirkt, so wird die Nadel eine solche Stellung einnehmen, wie sie der Resultierenden der beiden magnetischen Kräfte entspricht. Da die Wirkung eines magnetischen Feldes durch seine Richtung, Stärke und durch den Sinn vollständig bestimmt ist, so können wir sie mit Hilfe eines Vectors von gleicher Eigenschaft darstellen. Es seien NS und $N'S'$ (Fig. 158) die Richtungen zweier magnetischer Felder, und jedes sucht der Magnetnadel NS mit der Polstärke μ seine Richtung zu geben; p und q seien ihre Vectoren; die Nadel gibt dann durch ihre Stellung die Richtung und durch ihre Schwingungszahl die Intensität des resultierenden Feldes an. Es ist daher $\frac{q}{p} = \operatorname{tang} \varphi$, wobei φ den Ablenkungswinkel von der Richtung NS bedeutet. Sind nun H und H' die Intensitäten der beiden magnetischen Felder und ist $p = \mu H$ und $q = \mu H'$, so ist auch $H' : H = \operatorname{tang} \varphi$.

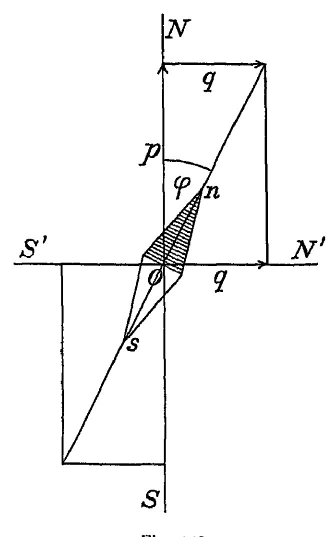


Fig. 158.

Stehen also zwei magnetische Felder aufeinander senkrecht, so gibt die trigonometrische Tangente des Ablenkungswinkels das Verhältnis der beiden Feldintensitäten an.

Während das magnetische Feld der Erde innerhalb weiter Grenzen als constant angesehen werden kann, ändert sich das von einem einzelnen Magnetpol ausgehende Feld sehr rasch, und überdies müssen wir die Wirkung beider Pole in Rechnung ziehen. Der Magnet NS (Fig. 159) habe die Poldistanz l und die Polstärke m, also das magnetische Moment $lm = M$. Er wirkt daher auf die Nadel ns mit dem Momente M' so ein, dass sie sich im Felde $\frac{m}{r^2}$, das vom Pole N ausgeht, mit dem Momente $M' . \frac{m}{r^2}$ in der Rich-

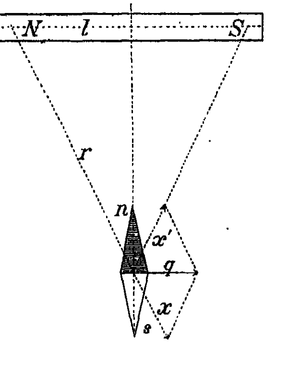


Fig. 159.

tung x, und in einem gleich starken Felde, das vom Pole S ausgeht, in der Richtung x' einzustellen sucht. Beide Drehmomente setzen sich zur Resultierenden q zusammen. Da q und x einerseits und l und r andererseits homologe Seiten ähnlicher Dreiecke sind, so besteht die Proportion: $q : x = l : r$; also ist

$$q = \frac{x\,l}{r} = M' \frac{m}{r^2} \cdot \frac{l}{r} = \frac{M'M}{r^3} = M' \cdot H',$$

wobei $H' = \frac{M}{r^3}$ die vom Magneten NS ausgehende Feldstärke ist. Setzen wir diese mit der Horizontalscomponente des Erdmagnetismus zusammen, so ist mithin $\operatorname{tang} \varphi = H' : H = M : (Hr^3)$ und daher $M : H = r^3 \operatorname{tang} \varphi$.

Verbinden wir diese Formel mit der früher abgeleiteten $p' = m\,H = 4\,\pi^2\,K\,n^2 : l$, so können wir aus den beiden Gleichungen $M\,H = 4\,\pi^2\,K\,n^2$ und $M : H = r^3 \operatorname{tang} \varphi$ sowohl M, wie auch H berechnen und erhalten so nach Gauß:

$$M = 2\,r\,\pi\,n\,\sqrt{r\,K \operatorname{tang} \varphi} \text{ und } H = \frac{2\pi n}{r}\sqrt{\frac{K}{r \operatorname{tg} \varphi}}.$$

Da in diesen Formeln für das magnetische Moment und für die Stärke des magnetischen Feldes nur Längen, Schwingungszahl und Masse (im Trägheitsmoment) vorkommen, so lassen sich diese beiden Größen auch auf die absoluten Einheiten zurückführen und mithin in cm, g und sec ausdrücken. Das setzt aber voraus, dass zwei Pole dann die Einheit des Magnetismus darstellen, wenn sie sich in der Entfernung von 1 cm mit einer Kraft von einem Dyn anziehen oder abstoßen.

Wir sind also jederzeit in der Lage durch Beobachtung der Schwingungszahl und des Ablenkungswinkels die in jedem Pol eines gegebenen Magneten vorhandenen, magnetischen Einheiten und die Intensität des magnetischen Feldes durch die absoluten Grundeinheiten auszudrücken. Die Horizontalcomponente der Feldstärke ist für Wien 0·208, für Berlin 0·186 und für Paris 0·196.

Die Richtung der magnetischen Kraft. Wenn wir die Richtung des geographischen Meridians mit der Richtung der Magnetnadel vergleichen, so sehen wir, dass diese beiden Richtungen miteinander einen Winkel einschließen; man bezeichnet denselben als Declinationswinkel, und daher die horizontal schwingende Magnetnadel als eine Declinationsnadel. Die Declination ist eine westliche, wenn der Nordpol der Nadel von der Nord-Süd-Richtung nach Westen abweicht, andernfalls eine östliche. Verbindet man durch eine Linie alle Orte der Erde, welche dieselbe Declination haben, so erhält man die sogenannten Isogonen. Die Linie der Orte mit der Declination 0° heißt Agone.

Die um eine verticale Achse sich drehende Magnetnadel gibt uns aber erst die in die horizontale Richtung entfallende Componente des Erdmagnetismus an. Beobachten wir dagegen die Lage einer Magnetnadel, die sich nach allen Richtungen frei bewegen kann, so schließt die Achse derselben auch mit der horizontalen Richtung einen Winkel ein, nämlich den Inclinationswinkel. Eine solche vollkommen frei bewegliche Magnetnadel erhalten wir am einfachsten, wenn wir die horizontal gestellte Achse AB einer Magnetnadel (Fig. 160), um die Richtung der Geraden FG, also um eine verticale Achse drehbar aufhängen. Die verticale Ebene, in der diese Nadel schwingt, enthält die Richtung der Declinationsnadel DD'. Stellen wir die Achse AB in diese Richtung DD', so muss die Nadelachse die Richtung der verticalen Componente OC einnehmen, sich also vertical

einstellen. Um daher mit Hilfe eines Inclinatoriums (Fig. 161) den Inclinationswinkel ψ zu finden, gibt man der Achse AB zuerst eine solche Stellung, dass sich die Nadel vertical einstellt und somit schon die Achsenstellung die Richtung der Declinationsnadel angibt; wenn wir dann die Achse um einen rechten Winkel drehen, so befindet sich die Inclinationsnadel in

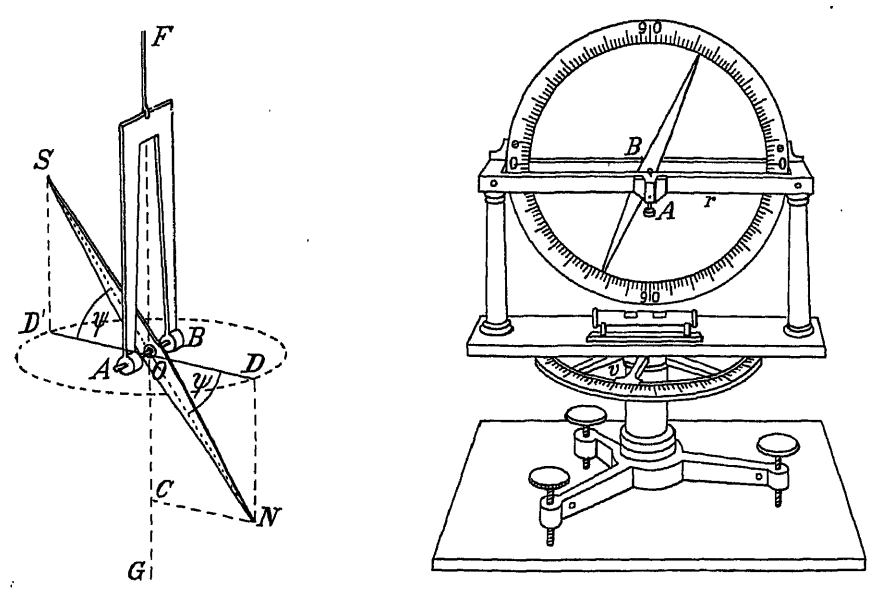


Fig. 160. Fig. 161.

der Declinationsebene, also in derselben Stellung, wie die vollkommen frei bewegliche Nadel NS. Die Verbindung aller Orte gleicher Inclination führt zur Construction der Isoclinen.

Die nach der Methode von Gauß bestimmte Intensität des erdmagnetischen Feldes bezieht sich also nur auf die Stärke der horizontalen Componente, und daher spricht man dann auch nur von der Intensität der Horizontalcomponente H. Aber erst die Intensität in der Richtung der Inclinationsnadel ergibt die volle Stärke des erdmagnetischen Feldes, und die Verbindung aller Orte, welche dieselbe Totalintensität aufweisen, führt zur Construction der Isodynamen.

Da nicht allein die Richtung der Declinationsnadel und die der Inclinationsnadel, sondern auch die Intensität des erdmagnetischen Feldes fortwährenden Veränderungen unterworfen ist, so dürfen wir alle diese Liniensysteme keineswegs als fest auffassen; sie sind nämlich sowohl periodischen, wie auch nicht periodischen „Variationen“ unterworfen. Wir werden in der kosmischen Physik auf dieselben zurückkommen.

Astatische Magnetnadeln. Wollen wir untersuchen, ob irgend ein Körper magnetisch sei, so nähern wir ihn den Polen einer Magnetnadel und beobachten, ob er auf dieselben eine anziehende Kraft ausübt. Da nun die Ablenkung der Nadel der resultierenden Richtung des erdmagnetischen Feldes und der anziehenden Wirkung des untersuchten Körpers entspricht, so fällt sie oft sehr klein aus und lässt sich dann nur durch sehr genaue Winkelbeobachtungen ermitteln. Der Ausschlagswinkel φ wird aber um so größer, je kleiner in der Formel tang $\varphi = H' : H$ der Divisor ist, also je

weniger die Horizontalcomponente des Erdmagnetismus zur Geltung kommt. Gelingt es uns, die Wirkung des erdmagnetischen Feldes ganz aufzuheben, so nennt man die Nadel eine astatische.

Um eine Magnetnadel zu astasieren, kann man in der Nähe der Magnetnadel einen Magnetstab so befestigen, dass sein Südpol nach Norden weist und daher wenigstens in der nächsten Nähe der Nadel das erdmagnetische Feld größtentheils oder ganz aufgehoben wird. Ein anderes Mittel, um denselben Zweck zu erreichen, besteht darin, dass man zwei gleich lange Magnetnadeln von gleicher Stärke in paralleler Stellung so miteinander verbindet, dass ihre Nord- und Südpole nach entgegengesetzten Richtungen weisen (Fig. 162). Da sich dann die Drehmomente der beiden Nadeln wenigstens annäherungsweise aufheben, während die einzelnen Pole ihre frühere Stärke beibehalten, so lässt sich die anziehende oder abstoßende Wirkung eines Eisenstückes viel leichter nachweisen, als unter dem vollen Einflusse des Erdmagnetismus.

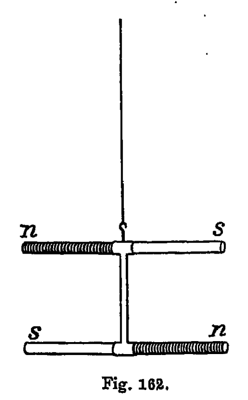


Fig. 162.

Paramagnetismus und Diamagnetismus. Bei der Untersuchung mancher Körper in sehr starken magnetischen Feldern ergab sich, dass dieselben nicht nur keinen Magnetismus annahmen, sondern sogar aus dem magnetischen und zwar sowohl aus dem nordmagnetischen, wie auch aus dem südmagnetischen verdrängt werden. Infolgedessen unterschied man paramagnetische und diamagnetische Körper, jenachdem sich dieselben ähnlich verhalten, wie das stark paramagnetische Eisen, ferner wie Nickel, Kobalt, Mangan, Chrom, Platin u. a. oder diamagnetisch wie Wismut, Antimon, Zink, Zinn und viele organische Stoffe. Wahrscheinlich ist aber diese Erscheinung darauf zurückzuführen, dass die letztgenannten Körper ebenfalls, wenn auch im geringeren Grade, paramagnetisch sind als die Luft, durch welche sie aus dem magnetischen Felde verdrängt wurden. Es ist also auch die Magnetisierbarkeit, wie das Wärmeleitungsvermögen und andere physikalische Eigenschaften bei den verschiedenen Körpern nur graduell verschieden.

Der Magnetismus gehört zu den Naturkräften, deren Grunderscheinungen bereits seit den ältesten Zeiten bekannt sind. Schon den Philosophen Thales, Empedokles, Demokritos und Diogenes von Apollonia waren die natürlichen Magnete bekannt, und sie versuchten sogar, den Magnetismus nach ihrer Weise philosophisch zu erklären.

Auch im Kudrunliede wird seiner Erwähnung gethan, aber es ist eigenthümlicherweise immer nur von einer progressiven und nie von einer drehenden Bewegung die Rede. Dagegen bedienten sich die Chinesen schon in den ältesten Zeiten der Magnetnadel, um sich auf ihren großen Landreisen zu orientieren; daraus lässt sich schließen, dass sie bereits künstliche Magnete herzustellen verstanden und wenigstens annäherungsweise ihre Abhängigkeit vom Erdmagnetismus kannten. Mit der Verbreitung dieser Kenntnis in Europa nahm die Schiffahrt auf hoher See sofort einen ungeahnten Aufschwung, und damit hängen vielfach die großen Länderentdeckungen zusammen. Christoph Columbus soll durch die starken Veränderungen der Declination, die er auf seinen Entdeckungsreisen bemerkte, nicht wenig beunruhigt worden sein. Als Begründer der systematischen Erforschung des Erdmagnetismus verdient W. Gilbert († 1603) hervorgehoben zu werden, welcher nicht nur die wichtigsten Eigenschaften der natürlichen und künstlichen Magnete erforschte, sondern bereits auch den Erdmagnetismus dadurch zu erklären suchte, dass er die Existenz eines großen Magneten im Innern der Erde annahm. Diese Ansicht ist aber unzutreffend, da der Magnetismus selbst im besten Eisen bei einer Temperatur von 600—700° C vollständig aufhört und daher das feuerigflüssige Erdinnere nicht magnetisch sein kann. Wir müssen daher annehmen, dass die relativ sehr dünne, feste Erdrinde der Sitz des Erdmagnetismus sei und denselben vielleicht nur zum geringen Theile ihrem Eisengehalte verdankt.

Man hat verschiedene Versuche gemacht, den Magnetismus auf einfachere Erscheinungsformen zurückzuführen und damit zu erklären. Die Annahme, dass ein nordmagnetisches und ein südmagnetisches Fluidum den Nord- und Südmagnetismus eines Magnetstabes hervorrufen, scheitert schon an dem Versuche, dass beim Zerbrechen eines Magneten jede Hälfte sowohl Nord- wie auch Südmagnetismus aufweist. Aber auch die Ansicht, dass der Gesammtmagnetismus nur die resultierende Wirkung der den Elementarmagneten zukommenden, molecularen Kräfte sei, begegnet einer Schwierigkeit, da die Vertheilung der magnetischen Kräfte nicht so beschaffen ist, wie sie nach dieser Annahme sein müsste. Dagegen gibt die zuerst von Faraday vertretene Kraft-

linientheorie wenigstens ein sehr anschauliches Bild der wirklichen Vorgänge, das man experimentell und vielfach sogar rechnerisch gut verfolgen kann. Die magnetischen Erscheinungen werden viel verständlicher, wenn man sie mit den Wirkungen der elektrischen Ströme in Zusammenhang bringt, wie dies bei der Lehre vom Elektromagnetismus geschieht.

Elektrostatik.

Dass der Bernstein, mit Wolle gerieben, die Eigenschaft erhält, kleine, leichte Körperchen anzuziehen und hierauf wieder abzustoßen, das war den Griechen schon 600 Jahre v. Chr. bekannt, und wir bezeichnen noch heute die Ursache aller damit zusammenhängenden Erscheinungen nach dem Namen des Bernsteines mit dem Worte Elektricität. Während aber die Magnetnadel schon um das 12. Jahrhundert durch ihre Verwendung bei der Schiffahrt culturhistorische Bedeutung gewonnen hat, trat die Elektricität erst im 19. Jahrhunderte, also fast siebenhundert Jahre später, nutzbringend in das Verkehrs- und Gewerbsleben ein, und auch jetzt nur im engsten Anschlusse an den Magnetismus, dem sich damit ein neues, weites Feld der Verwendung erschloss.

Dieselbe Eigenschaft, wie der Bernstein, haben noch viele andere Körper, z. B. alle Harze, wenn man sie mit Wolle oder Pelzwerk reibt; Otto von Guericke construierte eine Elektrisiermaschine, bei welcher die Elektricität durch Reiben einer Schwefelkugel mit der Hand erzeugt wurde, und erst im Jahre 1675 theilte Newton der „Royal Society“ mit, dass auch das Glas durch Reibung elektrisiert werden könne.

Fundamentalversuche. Hängen wir an einem Seidenfaden ein Hollundermarkkügelchen oder einen Papierballon auf, so wird dieses sogenannte elektrische Pendel (Fig. 163) von einem mit Wolle geriebenen Harzstabe zuerst angezogen, nach erfolgter Berührung wieder abgestoßen, und dann weicht es fortan jeder Berührung mit dem Harzstabe aus. Diese Wirkung des elektrischen Harzstabes unterscheidet sich von jener der Adhäsionskräfte durch die große Entfernung, vom Magnetismus dadurch, dass sie sich nicht nur auf die stark magnetisierbaren Körper erstreckt, von der Schwerkraft endlich durch die Richtung und auch dadurch, dass sie schon zwischen sehr kleinen Massen mit relativ großer Kraft auftritt.

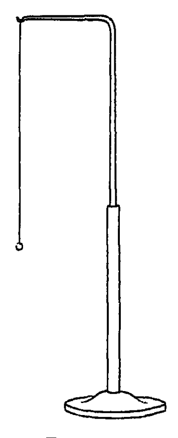


Fig. 163.

Wenn wir an verschiedenen Stellen des Zimmers solche elektrische Pendel aufhängen, so sehen wir, dass die erwähnte Erscheinung überall auftritt, wohin wir uns mit dem geriebenen Harzstabe begeben und dass er daher der Träger eines „elektrischen Feldes“ ist, d. h. dass sich in seiner Umgebung immer die beschriebenen Erscheinungen zeigen. Aber nicht nur der Stab, sondern auch das durch Berührung elektrisierte Pendel ist damit Träger eines elektrischen Feldes geworden; wenn wir uns nämlich mit der Hand ihm nähern, so kommt es uns immer entgegen, sobald die Hand in sein elektrisches Feld eindringt.

Wir stellen uns vier ganz gleiche, elektrische Pendel A, B, C und D her und elektrisieren zwei derselben, A und B, mit dem geriebenen Harzstabe, die beiden anderen, C und D, mittelst eines Glasstabes, den wir entweder mit Seide oder einem mit Amalgam bestrichenen Lederflecke gerieben haben. Auch bei der Elektrisierung mit dem Glasstabe werden die Pendel zuerst angezogen, dann abgestossen und weichen hierauf jeder weiteren Berührung mit dem Glasstabe aus. Wenn wir die beiden ersten Pendel A und B einander nähern, so stoßen sie sich gegenseitig ab, und die gleiche Erscheinung zeigt sich bei den Pendeln C und D. Dagegen ziehen sich

die Pendel A und C, also je ein mit dem Harzstab und mit dem Glasstab geladenes Pendel schon aus großer Entfernung an. Die von den beiden Stäben ausgegangenen Ladungen verhalten sich also entgegengesetzt, denn vom Pendel A wird das Pendel B abgestossen, das Pendel C aber angezogen. Wenn wir endlich die sich anziehenden Pendel einander berühren lassen, so gehen sie wieder in den unelektrischen Zustand über, falls ihre Ladungen gleich stark waren. Wenn wir dagegen die sich abstoßenden Pendel zur gegenseitigen Berührung bringen, ohne sie aber anderweitig zu berühren, so bleiben sie nach wie vor elektrisch.

Da wir ja zwei Zahlen, deren Summe gleich Null ist, als positiv und negativ bezeichnen, so nennen wir auch hier die eine der beiden Ladungen positiv, und zwar wählen wir hiezu die Glaselektricität, während wir die Ladung mit Harzelektricität als negativ auffassen wollen. Wir werden also fortan die erstere als positive und letztere als negative Elektricität hinstellen. Auf diesen mit dem Wesen der relativen Zahlen zusammenhängenden Charakter der beiden Ladungsarten hat zuerst Lichtenberg im Jahre 1735 hingewiesen.

Das Coulomb'sche Gesetz (1785). Ändern wir die Coulomb'sche Drehwage (Fig. 152) in der Weise ab, dass wir statt des Magnetstabes ns einen Schellackstab verwenden, der bei n eine kleine, metallisch überzogene Kugel trägt, und verwenden wir statt des zweiten Magneten ebenfalls einen solchen Stab mit einer gleichartigen Kugel, so können wir damit nachweisen, dass das Coulomb'sche Gesetz nicht nur für Magnetpole, sondern auch für die elektrischen Ladungen gilt. Die am horizontalen Stabe befindliche bewegliche Kugel sei zuerst unelektrisch; nach Berührung derselben mit der elektrisierten, feststehenden Kugel wird sie dieser, da sie ihr vollkommen gleich ist, die Hälfte der Ladung abnehmen und dann von ihr abgestoßen. Diese Abstoßung ist wieder viermal so stark, wenn wir die beiden Kugeln mittels des Torsionskopfes A bis auf die Hälfte nähern. Damit ist gezeigt, dass die abstoßende Kraft und damit auch die Stärke des magnetischen Feldes verkehrt proportional ist dem Quadrate der Entfernung.

Berührt man hierauf die feststehende Kugel mit einer dritten ebensogroßen, unelektrischen Kugel, so wird ihre Ladung abermals auf die Hälfte reduciert. Aus der Beobachtung der Torsion des Fadens ergibt sich ferner, dass dabei die Abstoßungskraft um die Hälfte kleiner geworden ist, und daher der Ladung proportional ist. Die abstoßende Kraft muss sich also auch der Ladung der beweglichen Kugel proportional ändern. Diese Beziehung zwischen der Stärke der beiden Ladungen und ihrem Abstande lässt sich daher durch die Formel ausdrücken $\frac{e \cdot e'}{r^2}$, wobei e und e' die beiden Ladungen und r ihre Entfernung bedeutet. Man drückt diese Beziehung auch mit den Worten aus: Zwei elektrische Ladungen stoßen sich ab oder ziehen sich an mit einer Kraft, die dem Producte ihrer Maßzahlen direct, dem Quadrate der Entfernung aber verkehrt proportional ist.

Die bei den Fundamentalversuchen auftretenden Erscheinungen lassen sich aber auch in folgender Weise auffassen: Jeder mit einer elektrischen Ladung versehene Körper ist Träger eines elektrischen Feldes, und wenn wir zwei solche Körper einander nähern oder miteinander berühren, so bringen wir damit beide elektrische Felder räumlich zur Deckung. Haben beide Körper gleichartige Ladungen, so wird durch die Vereinigung beider

Felder die Feldstärke gesteigert, sind sie ungleichartig, so wird eine Verminderung der Feldstärke eintreten. Zwei elektrisch geladene Körper, deren Felder ineinander übergreifen, suchen sich immer so zu bewegen, dass die Feldintensität vermindert wird.

Das Elektroskop. (Fig. 164.) An einer abgerundeten Metallplatte P ist eine Metallstange AB befestiget, welche zwei um C drehbare Aluminiumblättchen trägt. Die Stange ist mittels eines Kautschukstöpsels K im Halse eines größeren Glasgefäßes befestiget, das nur den Zweck hat, zufällige Luftströmungen abzuhalten. Jede ihm dabei mitgetheilte elektrische Ladung erkennt man an der Divergenz der Aluminiumblättchen, und diese ist um so stärker, je größer der Winkel ist, den die Blättchen mit der Stange AB bilden.

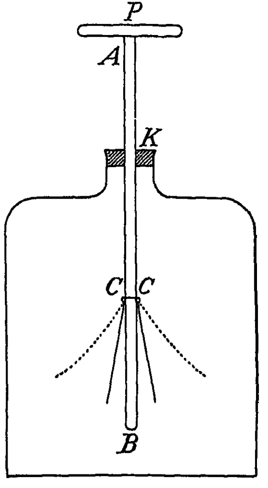


Fig. 164.

Die Blättchen des Elektroskopes divergieren aber auch schon, wenn sich die geriebene Harz- oder Glasstange in größerer Entfernung befindet, und damit deuten sie an, dass sich das Elektroskop bereits in einem elektrischen Felde befindet.

Das Elektroskop gibt uns ferner auch die Art der elektrischen Ladung an. Dabei bedient man sich zweckmäßig einer Metallkugel, die an einem Glasstäbchen befestiget ist und durch die man eine kleinere Ladung vom geriebenen Harz- oder Glasstab auf das Elektroskop überträgt; dadurch erhält das Elektroskop offenbar dieselbe Ladung wie der Stab, von dem wir sie nehmen. Wird nun die Divergenz eines Elektroskopes, dessen Ladungsart wir noch nicht kennen, durch die Übertragung einer Ladung von Glaselektricität gesteigert, so wissen wir, dass die frühere Ladung eine positive war, während sie eine negative sein musste, wenn die Divergenz dabei vermindert wird.

Elektricitätsleiter. Wenn wir zwei unelektrische Elektroskope in einiger Entfernung von einander aufstellen und dem einen durch Berührung eine Ladung mittheilen, so bleibt das zweite noch immer unelektrisch. Wenn wir dann die beiden Elektroskope durch einen Metalldraht verbinden, so sehen wir, wie die Ladung sofort auf das zweite Elektroskop übergeht. Wenn wir dagegen die beiden Elektroskope durch eine Harz- oder Glasstange miteinander verbinden, so geht die nur dem einen Elektroskope mitgetheilte Ladung nicht auf das zweite Elektroskop über. Wir nennen daher den Metalldraht einen L e i t e r, und den Glas- und Harzstab einen N i c h t l e i t e r.

Ist ein Leiter ganz von Nichtleitern umgeben, so kann ihm offenbar keine Ladung zugeführt werden, und wenn er schon eine solche besitzt, so kann er dieselbe nicht verlieren. Man sagt dann, der Leiter sei i s o l i e r t und bezeichnet daher auch die Nichtleiter als I s o l a t o r e n.

Die gebräuchlichsten Isolatoren sind Harz, Siegellack, Hartgummi, Glas und Paraffin. Chemisch vollkommen reines Wasser ist ebenfalls ein guter Isolator; sobald es aber chemisch oder mechanisch verunreinigt ist, wird es sofort zu einem relativ guten Elektricitätsleiter, besonders durch einen Zusatz der gutleitenden Schwefelsäure. Auch das Glas ist nur dann ein Nichtleiter, wenn seine Oberfläche vollkommen trocken und rein ist. Beim Papier hängt die Leitungsfähigkeit größtentheils von der Feuchtigkeit der Luft ab, und daher kann es weder als guter, noch als schlechter Leiter hingestellt werden; ähnliches gilt vom Holze; man spricht daher in solchen Fällen von Halbleitern. Vorzügliche Isolatoren sind ferner die fetten Öle, solange sie nicht in

Zersetzung begriffen sind, und die meisten Gase mit Ausnahme des Wasserstoffgases, das auch in dieser Hinsicht metallischen Charakter zeigt.

Die besten Leiter sind die Metalle, voran Silber und Kupfer. Ihr Elektricitätsleitungsvermögen werden wir bei der Lehre von den elektrischen Strömen noch näher kennen lernen und finden, dass auch sie nicht absolut vollkommene Leiter sind. Es ist also auch das Elektricitätsleitungsvermögen wie das Wärmeleitungsvermögen ein relatives; es gibt also keinen absoluten Nichtleiter oder vollkommenen Isolator, sondern nur mehr oder weniger gute Elektricitätsleiter. Der menschliche Körper kann als guter Leiter betrachtet werden, da die Berührung mit der Hand genügt, um ein Elektroskop zu entladen.

Der Sitz der elektrischen Ladung. Umgeben wir ein Elektroskop mit einem dichten Drahtgitter (Fig. 165), und verbinden wir die aus demselben

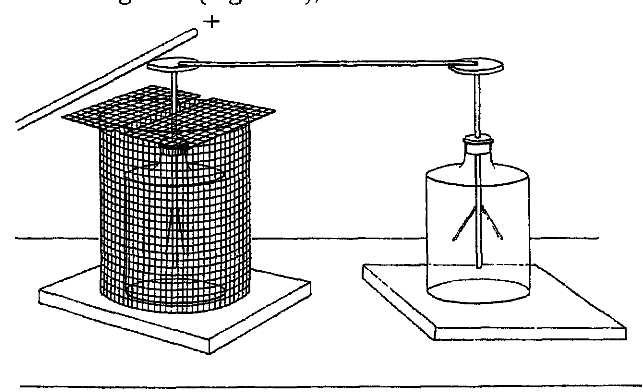


Fig. 165.

hervorragende Metallplatte mit einem zweiten, außerhalb stehenden Elektroskope, so können wir dem Drahtgitter beliebig starke Ladungen mittheilen, die Blättchen des ersteren Elektroskopes erweisen sich trotzdem noch immer als unelektrisch. Dass aber das Drahtgitter, welches auf einem Isolator ruht, wirklich der Sitz einer elektrischen Ladung war, ergibt sich daraus, dass bei

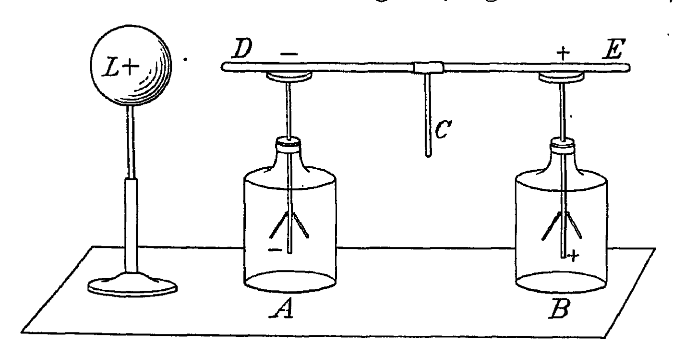


Fig. 166.

der Berührung des Gitters mit der Hand auch das zweite Elektroskop sofort seine Ladung verliert. Im Innern eines elektrisch geladenen Leiters zeigt also das Elektroskop keine Ladung an, selbst wenn es mit jenem leitend verbunden ist und sich mitten im elektrischen Felde befindet.

Elektrische Influenz. Wir verbinden wieder die beiden Elektroskope A und B (Fig. 166) mit einem Leiter DE, den wir mittels des isolierenden

Griffes C wegnehmen können, ohne die Elektricität abzuleiten. Nähern wir dem Elektroskope A einen positiv geladenen Leiter L, so zeigen beide Elektroskope einen Ausschlag; wenn wir dann das Verbindungsstück DE isoliert abheben, und die Ladungen der beiden Elektroskope mit der positiven Ladung des Leiters L vergleichen, so bemerken wir, dass das nähere Elektroskop negativ, also entgegengesetzt elektrisiert worden ist, das entferntere aber die gleichnamige Elektricität erhalten hat. Man sagt in diesem Falle, die Elektrisierung ist durch Vertheilung oder durch Influenz erfolgt, wobei sich die ungleichnamige Elektricität am näheren Ende, die gleichnamige dagegen auf der entfernteren Seite sammelt.

Wenn der Körper L, der die Vertheilung hervorgerufen hat, entfernt wird, ohne den Leiter DE wegzunehmen, so vereinigen sich die beiden Ladungen wieder und der Körper wird unelektrisch, wie er es früher war. Daraus schließen wir, dass beide Ladungen in gleicher Menge aufgetreten sind, da nur gleich große, aber entgegengesetzte Ladungen sich vollständig aufheben können.

Nähern wir einem Elektroskope von oben einen elektrisierten Glasstab, so wird dasselbe, ohne dass wir es berühren, durch Influenz elektrisch, und zwar wird die Metallplatte negativ, während die Aluminiumblättchen positiv elektrisch werden. Nähern wir einem bereits geladenen Elektroskop einen geriebenen Harzstab, so sinken die Blättchen zusammen, wenn die Ladung des Elektroskopes positiv war, da die Blättchen durch Influenz dieselbe Elektricität erhalten, wie die Harzstange; im entgegengesetzten Falle nimmt ihre Divergenz zu.

Da sich die bei der Vertheilung gebildeten, elektrischen Ladungen gegenseitig anziehen, weil sie entgegengesetztes Zeichen haben, so muss eine gewisse Arbeit geleistet werden, um die beiden Elektricitäten voneinander zu trennen. Die Vertheilung ist auch die Ursache, warum überhaupt ein unelektrischer Körper von einem elektrischen angezogen und dann abgestoßen wird. Es tritt nämlich die entgegengesetzte Ladung stets auf jener Seite auf, die dem influenzierenden Körper näher ist, die Anziehung ist daher größer als die Abstoßung. Sobald sich aber bei der Berührung die entgegengesetzte Ladung ausgeglichen hat, wird der gleichartig elektrisierte Körper abgestoßen. Jede solche Arbeitsleistung durch die Anziehung und darauf erfolgende Abstoßung ist also für den Körper, von welchem sie ausgieng, mit einem entsprechenden Ladungsverluste verbunden. Man kann aber auch einem Leiter durch Vertheilung eine elektrische Ladung geben, ohne ihn mit der Elektricitätsquelle zu berühren. Wenn wir nämlich den durch Vertheilung elektrisierten Körper vorübergehend mit der Erde in leitende Verbindung bringen, so erhält er die entgegengesetzte Elektricität des Leiters, der die Vertheilung bewirkt hat. Ist dieser z. B. positiv geladen, so wird der genäherte Körper auf der zugewendeten Seite negativ und auf der abgewendeten positiv elektrisch; aber auch die Hand, mit der wir ihn berühren wollen, wird durch Influenz negativ elektrisch, und diese ihre negative Ladung gleicht sich nun mit der positiven Ladung des Körpers aus, auch wenn sie sich auf der anderen Seite des influenzierten Körpers befindet. Diesen Vorgang drückt man auch mit den Worten aus, die ungleichnamige Elektricität sei durch die Anziehung der influenzierenden Ladung gebunden, die gleichnamige aber frei. Beide Ausdrücke besagen also nur, dass die Vertheilung auch dann eintrete, wenn der Körper mit der Erde in leitender Verbindung steht und sich daher die gleichnamige Ladung so weit entfernen kann, dass sie nicht mehr nachweisbar ist.

Das elektrische Potential. Um zwei mit derselben Elektricität geladene Leiter einander zu nähern, ist eine gewisse Arbeitsleistung nöthig. Ziehen sich zwei mit entgegengesetzten Elektricitäten geladene Körper aus größerer Entfernung an, so leisten diese Ladungen eine Arbeit, indem sie die Massen der Körper in Bewegung versetzen. Wenn wir zwei Hollundermarkkügelchen, jedes von 1 g Gewicht, an gewichtslosen Fäden von 490·5 cm Länge aufhängen könnten, und diese auf ihnen befindlichen Ladungen reichen eben hin, um sich gegenseitig bis auf einen cm Entfernung abzu-

stoßen, so enthalten beide gerade die Einheit der elektrischen Ladung. Ziehen wir in den Mittelpunkten beider Kügelchen Tangenten an den von ihnen beschriebenen Kreis, so erhalten wir beiderseits eine schiefe Ebene, bei der sich die Höhe zur Länge wie 1:981 verhält, und daher kommt von den 981 Dyn, die jedes Kügelchen wiegt, nur ein Dyn in der Richtung zur Ruhelage der Pendel zur Geltung. Die beiden Ladungen stoßen sich also in der Entfernung von 1 cm mit einer Kraft von 1 Dyn gegenseitig ab; wir wählen sie daher als Einheit der Elektricitätsmenge des absoluten, elektrostatischen Maßsystemes. Die $3 \cdot 10^9$ mal so große Elektricitätsmenge führt als praktische Einheit den Namen Coulomb.

Wenn von zwei Ladungen die eine e solcher Einheiten, die andere nur eine enthält, so wird die letztere ebenso vielmal stärker abgestoßen und würde auch, wenn ihre Abstoßung auf größere Entfernung nicht mit einer Arbeitsleistung verbunden wäre, aus dem ganzen Bereiche des elektrischen Feldes verdrängt, das streng genommen in die größten Fernen reicht. Andererseits wäre die Zurückführung dieser Einheitsladung durch das ganze elektrische Feld bis auf die Entfernung r der gleichbezeichneten Ladung e mit einer Arbeit $P = e : r$ verbunden, und diese bezeichnen wir als das elektrische Pontential der Ladung e in der Entfernung r.

Sind r_1 und r_2 die Entfernungen zweier Punkte von der Ladung e, so ist für dieselben $P_1 = e : r_1$ und $P_2 = e : r_2$ und daher $P_1 > P_2$, wenn $r_1 < r_2$; der Potentialunterschied ist also $P_1 - P_2 = \frac{e}{r_1} - \frac{e}{r_2} = \frac{e\,(r_2 - r_1)}{r_1\, r_2}$. Sind die beiden Entfernungen nahezu gleich, so ist in der mittleren Entfernung $r = \sqrt{r_1 r_2}$ zur Annäherung der gleichbezeichneten Ladungseinheit um die Strecke $d = r_2 - r_1$ die Arbeit $k \cdot d$ nöthig, wenn $k = \frac{e \cdot 1}{r^2}$ die abstoßende Kraft zwischen den Ladungen e und 1 bedeutet. Zur Annäherung von r_3 nach r_2 ist dann die Arbeit $P_2 - P_3 = \frac{e}{r_2} - \frac{e}{r_3}$ nöthig und zur Verschiebung von r_3 nach r_1 die Arbeit
$P_1 - P_3 = P_1 - P_2 + P_2 - P_3 = \frac{e}{r_1} - \frac{e}{r_2} + \frac{e}{r_2} - \frac{e}{r_3} = \frac{e}{r_1} - \frac{e}{r_3}$. Ist r_n eine so große Entfernung, dass $\frac{e}{r_n}$ im Vergleiche zu $\frac{e}{r_1}$ verschwindend klein ist, so können wir $\frac{e}{r_1} - \frac{e}{r_n}$ durch $\frac{e}{r_1}$ ersetzen, und $P_1 = \frac{e}{r_1}$ stellt daher die Arbeit dar, die nöthig ist, um die Ladungseinheit aus der Entfernung r_n, also gewissermaßen aus unendlich großer Entfernung in die Entfernung r_1 zu bringen, und daher bezeichnet man diesen Ausdruck $P = \frac{e}{r}$ als das Potential der Ladung e in der Entfernung r.

Jeder geladene Leiter ist also von einem elektrischen Felde umgeben, dessen Potentialwerte mit zunehmender Entfernung immer mehr abnehmen. Alle Punkte, in denen das Potential denselben Wert hat, bilden zusammen eine Äquipotential- oder Niveaufläche. Die Verschiebung der Ladungseinheit innerhalb einer Äquipotentialfläche erfordert keine Arbeit, weil auf einer solchen Bahn keine Potentialunterschiede herrschen. Ist der Leiter, der das elektrische Feld hervorruft, eine Kugel, so haben auch alle Äquipotentialflächen Kugelgestalt. Die Oberfläche jedes Leiters ist selbst eine Äquipotentialfläche, da im gegentheiligen Falle die Elektricität sofort die vorhandenen Potentialunterschiede ausgleichen würde. Aus demselben Grunde herrscht auch im Innern eines Leiters überall dasselbe Potential.

Im Mittelpunkte einer metallenen Hohlkugel (Fig. 167) mit dem Radius r befinde sich eine zweite Metallkugel K, auf welcher die Ladung e sitzt; dann stellt die äußere Metallkugel die Niveaufläche mit dem Potentialwerte $e:r$ dar. Wenn wir dann die äußere, bisher isolierte Kugel durch einen dünnen Draht mit der inneren verbinden, so wird deren Ladung sich sofort auf der Oberfläche der äußeren Kugel ausbreiten, ohne dass deshalb ihr Potential für die weitere Umgebung einen anderen Wert annimmt, denn es hat sich dabei weder die Menge noch der Ort geändert, um welchen die Ladung gleichmäßig vertheilt ist. Die durch den Radius der Kugel dividierte Maßzahl der Ladung $e:r$, gibt uns zugleich das Potential der Ladung auf der neuen Oberfläche an und auf die Flächeneinheit entfällt die Elektricitätsmenge $\frac{e}{4r^2\pi}$, die wir Dichte der Ladung nennen.

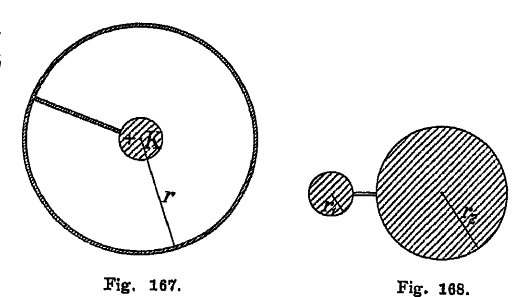


Fig. 167. Fig. 168.

Zwei kugelförmige Leiter (Fig. 168) mit den Halbmessern r_1 und r_2 seien mit gleichnamigen Elektricitäten geladen und werden durch einen Draht leitend miteinander verbunden. Der so entstandene Leiter wird daher auf der ganzen Oberfläche ein und dasselbe Potential annehmen, und dieses ist für die kleinere Kugel $e_1 : r_1$ und für die größere Kugel $e_2 : r_2$. Es besteht die Gleichung $e_1 : r_1 = e_2 : r_2$; die Dichte der Ladung auf der ersteren Kugel ist demnach $d_1 = \frac{e_1}{4\pi r_1^2}$ und auf der zweiten $d_2 = \frac{e_2}{4\pi r_2^2}$.

Daraus folgt die Proportion $d_1 : d_2 = \frac{e_1}{4\pi r_1^2} : \frac{e_2}{4\pi r_2^2} = e_1 r_2^2 : e_2 r_1^2 = r_2 : r_1$.

Mithin ist auf der kleineren Kugel die Ladung so viel mal dichter, als ihr Radius kleiner ist. Eine ähnliche Erscheinung tritt bei allen Leitern auf, die eine verschieden stark gekrümmte Oberfläche besitzen. Das Potential ist auf der ganzen Oberfläche gleich, aber die Dichte der Ladung ist an den einzelnen Stellen derselben um so größer, je schärfer die Krümmung ist. Am dichtesten ist sie an spitzigen Vorsprüngen, und daher entweicht auch die Elektricität durch eine scharfe Spitze wie durch einen mäßig guten Leiter. Wenn man einen Leiter, der in eine scharfe Spitze ausläuft, einem elektrischen Körper gegenüberstellt, so nimmt er sofort die Ladung desselben an, ohne mit dem Körper in Berührung zu kommen, da durch die Spitze die durch Influenz hervorgerufene, ungleichnamige Elektricität entweicht und daher die gleichnamige Elektricität zurückbleibt; dieser Vorgang macht also den Eindruck, als wäre diese Ladung durch eine „Saugwirkung der Spitze" auf den Leiter übergegangen.

Das Elektrometer. Zur genauen Messung zweier Potentialunterschiede bedient man sich am besten des Quadrantenelektrometers (Fig. 169), welches der englische Physiker William Thomson (Lord Kelvin) im Jahre 1867 construierte.

Von den vier Quadranten A, B, C und D sind je zwei gegenüberliegende leitend miteinander verbunden, also A mit C und B mit D;

werden diese Quadrantenpaare mit entgegengesetzten Elektricitäten geladen, s erhalten wir vier elektrische Felder, und in diese bewegt sich die „Nadel“ NN, die in ihren Mittelpunkte O isoliert aufgehängt ist. Di Aufhängungsvorrichtung ist so beschaffen, das die Nadel immer die in der Figur angegeben Stellung beizubehalten sucht. Ein unterhal der Nadel angebrachter Draht gestattet vo der Platte R aus der Nadel eine elektrisch Ladung zuzuführen. Man verbindet zuerst da Quadrantenpaar A und C mit der Erde, wo durch es wie diese das Potential „Null“ annimmt Hat nun die isolierte Metallplatte Q ein andere Potential als die „an Erde“ gelegte Platte P_2 so tritt zwischen beiden Quadrantenpaare ein Pontentialunterschied auf, und wenn di Nadel dasselbe Potential hat wie die Platte Q so würde sie sich, von B und D abgestoßen genau über den Quadranten A und C einstellen wenn diese Drehung nicht in der Aufhänge vorrichtung einen Widerstand fände. Nach de Größe dieses Drehungswinkels bemisst ma den Potentialunterschied zwischen P_2 und Q Gibt man diesen beiden Platten einen Potential unterschied, dessen Wert man anderswoher kennt so kann man das Instrument zuerst aichen un dann unbekannte Potentialunterschiede durc Vergleichung des Ausschlages messen. Ma kann übrigens auch die Nadel mit der Platte Q verbinden. Hätten wir das entgegengesetzte Quadrantenpaar an Erde gelegt so wäre der Aufschlag nach der anderen Seite eingetreten. Dieses Mess instrument hat den großen Vorzug, dass die elektrischen Ladungen, dere Potentialunterschiede miteinander verglichen werden, auch beim Messen vo einander isoliert bleiben.

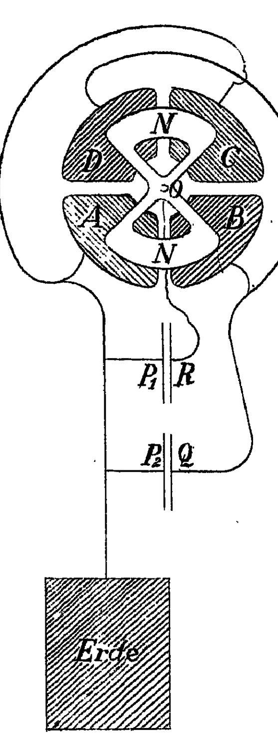


Fig. 169.

Der elektrische Condensator. Im wesentlichen besteht dieser au

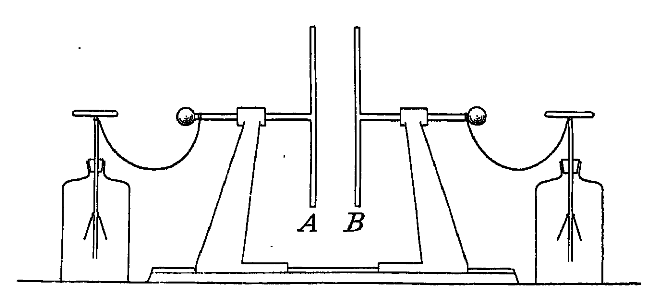


Fig. 170.

zwei Leitern, die durch einen Nichtleiter von einander getrennt sind Wir erhalten demnach einen Condensator, wenn wir z. B. beide Seiten eine Glasscheibe bis auf einen breiten Rand mit Stanniol belegen, oder wen

wir zwei isolierte Metallplatten einander parallel gegenüberstellen, dass sie nur mehr durch eine isolierende Luftschichte voneinander getrennt sind. (Fig. 170.) Theilen wir der „Belegung“ A eine positiv elektrische Ladung mit, so wird die Belegung B durch Influenz elektrisch, und nachdem wir die freie, positive Elektricität durch Berührung der Belegung B mit der Hand abgeleitet haben, sagen wir, der Condensator sei „geladen“.

Beide Belegungen besitzen ein elektrisches Feld von gleicher Stärke und Form. Stellen wir die beiden Platten sehr nahe einander gegenüber, so bringen wir damit beide Felder annähernd zur Deckung, und dann heben sich ihre Wirkungen, da die Ladungen entgegengesetzt sind, nach außen hin nahezu auf. Würden wir beide Belegungen leitend miteinander verbinden, also den Condensator „entladen“, so würden sich die Felder vollständig aufheben. Aber nicht nur in der Umgebung, sondern auch auf den Belegungen selbst wird das Potential durch die gegenseitige Annäherung stark vermindert.

Wenn wir nämlich die beiden Belegungen mit zwei Elektroskopen verbinden und dann die isolierenden Träger auseinanderziehen, so bemerkt man sofort, wie die ursprünglich kaum merklich divergierenden Blättchen sehr rasch eine immer stärkere Spannung anzeigen. Schieben wir dann die Platten nahe zusammen, so verschwindet der Ausschlag wieder. Laden wir die eine

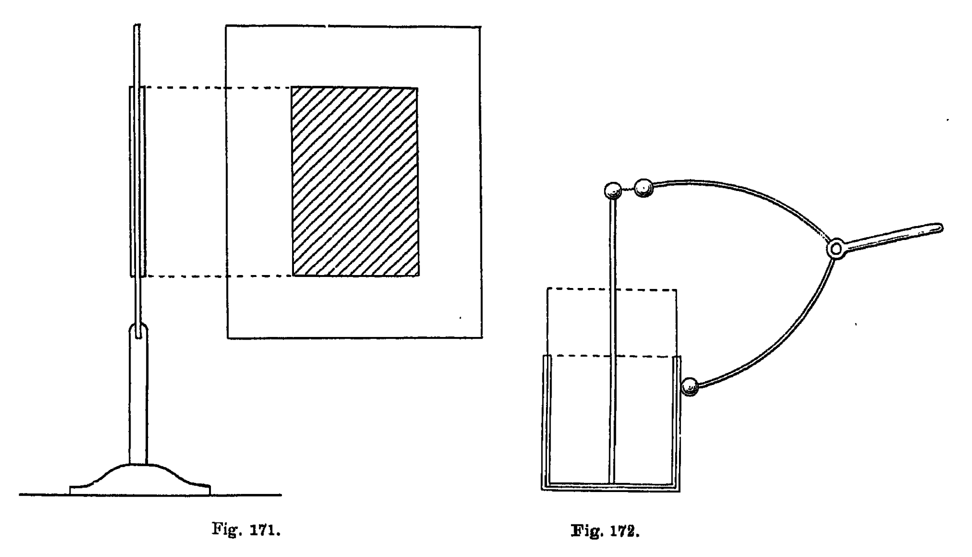


Fig. 171. Fig. 172.

Platte mit einer Harzstange, während sich die zweite Platte noch in einiger Entfernung befindet, und leiten wir die freie Elektricität der letzteren zur Erde ab, so wird sich auf der ersteren eine gewisse Elektricitätsmenge ansammeln; wenn wir hierauf die Platten einander noch näher bringen, so wird das Potential auf beiden Belegungen sinken und von der Harzstange neuerdings Elektricität auf die eine überfließen, während dies bei der ersten Ladung nicht mehr möglich war. Wir können also auf den Belegungen eines Condensators eine desto größere Elektricitätsmenge ansammeln, je näher sie einander sind. Man bezeichnet daher jene Condensatorplatte, die man zur Ladung benützt hat, als die C o l l e c t o r p l a t t e, und die andere, mit deren Hilfe diese Verstärkung der Ladung möglich geworden ist, als C o n d e n s a t o r p l a t t e.

Sind die beiden Platten nur durch eine Luftschichte voneinander getrennt, wie in Fig. 170, so spricht man von einem Luftcondensator. Die Franklin'sche Tafel (Fig. 171) besteht dagegen aus einer mit Schellack überzogenen Glasscheibe, die auf beiden Seiten bis auf einen ziemlich breiten, isolierenden Rand mit Stanniol belegt ist. Bei der Leydnerflasche bildet die isolierende Schichte ein Becherglas oder eine Glasflasche, welche außen und innen mit Stanniol überzogen ist; die innere Belegung steht mit einer leitenden Stange in Verbindung, durch welche man die Flasche entladen kann. Zur Entladung bedient man sich eines eigenen „Entladers", da dieselbe bei größeren Leydnerflaschen für den menschlichen Körper geradezu gefährlich werden kann. (Fig. 172.)

Werden mehrere gleiche Leydnerflaschen so miteinander verbunden, dass die äußeren Belegungen untereinander in leitender Verbindung stehen, und ebenso auch die inneren, so wirken sie wie ein einziger Condensator, dessen Belegungsfläche gleich ist der Summe aller verbundenen Belegungen, und dann sagt man, die Flaschen sind nebeneinander geschaltet.

Wenn man aber die innere Belegung der ersten mit der äußeren Belegung der zweiten, und die innere der zweiten Flasche mit der äußeren der dritten u. s. w. verbindet, so sagt man, die Flaschen sind hintereinander geschaltet. Hat jede dieser Flaschen dieselbe Potentialdifferenz, so ist der Potentialunterschied von allen Flaschen zusammengenommen n mal größer, als der einer einzigen.

Die Entladungswirkung der Leydnerflasche auf den menschlichen Körper bemerkte zuerst von Kleist zu Kamin in Pommern im Jahre 1745, als er ein Medicinglas, in dem sich ein eiserner Nagel befand, an die Elektrisiermaschine hielt und dann den Nagel herausnehmen wollte; dabei entlud sich dieser Condensator, bei dem der Inhalt des Medicinglases die innere und die Hand die äußere Belegung gebildet hatten. Dieselbe Beobachtung machte im folgenden Jahre Cunaeus zu Leyden, als er im Laboratorium des Physikers Pieter van Muoschenbroeck die Elektricität in ein Wasserglas leiten wollte. Die kräftige Zuckung, die der Körper bei solchen Entladungen unwillkürlich macht, erregte großes Aufsehen, weshalb dieser Versuch unter dem Namen „Der Leydner Versuch" bekannt wurde; daher führen auch die Condensatoren in dieser Form noch heute den Namen Leydnerflaschen. Benjamin Franklin (1706—1790) beschäftigte sich erst im reiferen Alter mit physikalischen Experimenten und insbesonders mit der Theorie der Elektricität. Dabei bildete natürlich das Studium der Influenzerscheinung am Condensator eine hervorragende Rolle und deshalb trägt die Franklin'sche Tafel noch jetzt seinen Namen. Die Abhängigkeit des Potentialunterschiedes von der Entfernung der Platten hat zuerst Volta (1784) richtig erkannt.

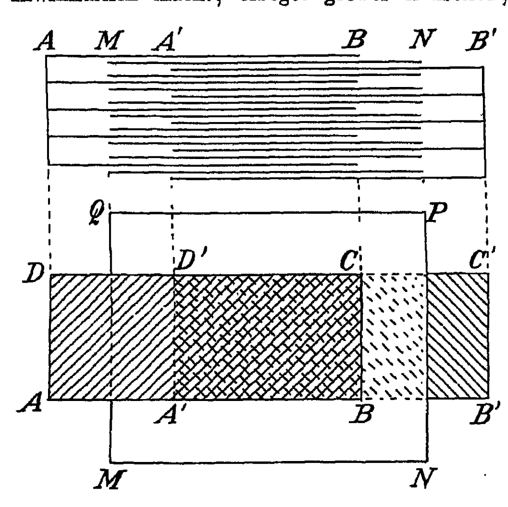


Fig. 173.

Um Condensatoren herzustellen, die sehr große Elektricitätsmengen in sich aufzunehmen vermögen, legt man zwischen je zwei Stanniolblätter in den Lagen $ABCD$ und $A'B'C'D'$ sehr dünn gespaltene Glimmerblätter oder mit Paraffin getränktes Papier von der Form $MNPQ$ und verbindet dieselben in der Weise untereinander, wie es in der Figur 173 angegeben ist. Die bei AD hervorragenden

Blätter bilden die eine und die bei $B' C'$ die zweite Belegung dieses sogenannten Blättercondensators.

Die Capacität. Wie das Volumen eines cylindrischen Gefäßes nicht nur durch seine Höhe, sondern auch durch die Grundfläche bestimmt wird, so hängt auch die von einem Leiter aufgenommene Elektricitätsmenge sowohl von der Höhe des Potentials, wie auch von den Dimensionen des Leiters ab. Nimmt ein Leiter bei der Ladung e das Potential P an, so setzen wir $e = P \cdot C$ und bezeichnen den Factor $C = e : P$ als die Capacität dieses Leiters; die Capacität ist also der Quotient aus der Elektricitätsmenge und dem Potential, welches dieselbe auf diesem Leiter annimmt.

Bei einem kugelförmigen Leiter ist das durch die Elektricitätsmenge e hervorgerufene Potential $P = e : r$ und daher $C = e : P = r$, also der Halbmesser der Kugel zugleich ein Maß ihrer Capacität. Dass die Capacität im hohen Grade von der Form des Leiters abhängt, lässt sich durch folgenden Versuch zeigen. Gibt man auf die Platte eines Elektroskopes eine metallene Schale, in der sich eine Kette befindet, und ladet man das Elektroskop, so wird die Divergenz der Blättchen abnehmen, wenn wir das eine Ende der Kette an einem isolierenden Griff in die Höhe heben, während das andere Ende noch mit dem Elektroskope in Berührung bleibt. Sobald wir aber die Kette in die Schale allmälig zurücksinken lassen, tritt die frühere Divergenz der Blättchen wieder hervor. Beim Abnehmen des Potentiales hat also die Capacität zugenommen, während sie später beim Zunehmen des Potentials wieder kleiner wird.

Bei der Beschreibung des Condensators haben wir bereits gesehen, dass das Potential der Platten zunimmt, wenn wir sie voneinander entfernen; daher nimmt auch die Capacität eines Condensators in demselben Maße ab, wie das Potential zunimmt. Die Capacität eines Condensators hängt also in erster Linie von der Entfernung der beiden Belegungen ab und ist für sehr kleine Entfernungen derselben proportional.

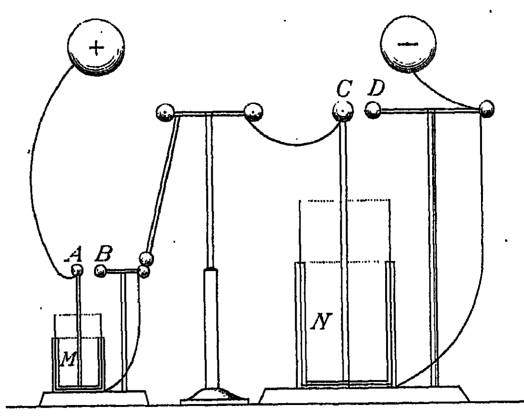


Fig. 174.

Wenn man die äußere und innere Belegung einer Leydnerflasche M (Fig. 174) mit zwei Metallkugeln A und B leitend verbindet, so tritt zwischen diesen eine Entladung in Gestalt eines elektrischen Funkens ein, sobald das Potential eine gewisse Höhe erreicht hat und damit auch auf jeder Belegung eine bestimmte Menge Elektricität angehäuft ist.

Schalten wir diese sogenannte „Maßflasche“ mit einer anderen Leydnerflasche „hintereinander“, wie es die Fig. 174 zeigt, so wissen wir, dass die Elektricitätsmenge in der größeren Flasche N jedesmal um denselben Betrag gestiegen ist, so oft bei der kleineren Flasche eine Entladung eintritt. Da bei gleicher Größe der Funkenstrecken AB und CD die Entladung auch beim gleichen Potentialunterschiede erfolgt, so können wir die Capacitäten

dieser beiden Flaschen miteinander vergleichen, indem wir zählen, auf wi viele Entladungen der kleineren Flasche eine der größeren entfällt. De Unterschied zwischen der Capacität eines Condensators und der eines fre stehenden kugelförmigen Leiters ist so groß, dass ein Luft-Condensator m kreisförmigen Platten von 12 m Durchmesser und 1 mm Plattendistanz die selbe Capacität besitzt, wie eine Metallkugel mit einem Radius von 9 km

Die Verschiedenheit der Diëlektricitätsconstanten. Es ist für d Capacität eines Condensators nicht gleichgiltig, durch welchen Nichtleiter di beiden Belegungen voneinander getrennt werden. Wenn sich zwischen de Condensatorplatten Luft befindet, ist sie bereits um 0·06$^0/_0$ größer, als wen sich zwischen denselben ein luftleerer Raum befindet. Bei Verwendung eine Paraffinschichte steigt die Capacität bereits auf das Doppelte, und dann sag man, der Wert der Diëlektricitätsconstanten sei für das Paraffin gleich : Unter der Diëlectricitätsconstanten versteht man also die Zah welche angibt, wie vielmal die Capacität eines Condensators größer wir wenn bei gleicher Größe und Entfernung der Platten der luftleere Raum zwischen den Platten durch diesen Körper ausgefüllt wird.

Sie beträgt für Hartgummi 2·5, für Schellack 3, für Schwefel 4, fü Glas 3—9 und für Glimmer 6·6. Letzterer eignet sich aber auch darum ganz besonders als Isolationsschichte, weil er sich in außerordentlich dünn Blättchen spalten lässt, ohne deshalb allzusehr seine Festigkeit einzubüße Bei Leinöl beträgt der Wert der Diëlektricitätsconstanten 3·5, für reine Alkohol 26 und für chemisch reines Wasser sogar 80. Die Isolierung durc Flüssigkeiten hat gegenüber festen Körpern den Vorzug, dass sich die Is lation von selbst wieder herstellt, wenn sie durch eine Entladung unterbroche worden ist, andererseits hat sie aber auch den Nachtheil, dass sehr leicht b chemischen Veränderungen und bei mechanischen Verunreinigungen ei leitende Verbindung zwischen den Condensatorplatten herbeigeführt und d durch der Condensator unbrauchbar wird.

Wie wichtig die Isolationsschichte eines Condensators für dessen Wi kungsweise ist, ergibt sich noch durch folgenden Ve such. Wir laden eine Leydnerflasche, deren Belegunge vom Glase abgenommen werden können (Fig. 175 und zerlegen sie nach einiger Zeit, indem wir zuer die innere Belegung B isoliert herausnehmen u durch Berührung mit der Hand unelektrisch mache dann nehmen wir aus der äußeren Belegung A d Glas G heraus und leiten auch von der äußer Belegung die Elektricität ab; wenn wir hierauf d Leydnerflasche wieder zusammensetzen, so erweist s sich wieder als geladen. Die beiden Elektricitäte welche sich beim Laden gegenseitig gebunden habe müssen also in das Glas eingedrungen sein und si selbst nach Entfernung der Belegungen gegenseit festgehalten haben, ohne sich aber durch das Gl hindurch auszugleichen. Damit stehen auch die f genden Entladungserscheinungen in Zusammenha Wenn wir eine Leydnerflasche in der Weise entlade dass wir nur eine der beiden Belegungen mit dem Entlader in leitende Ve bindung bringen und den Funken aus einer gewissen Entfernung überspring

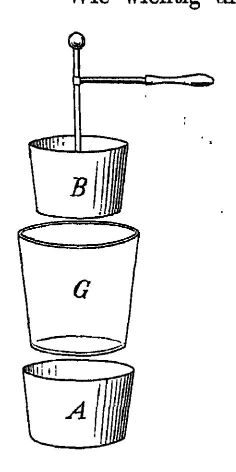


Fig. 175.

lassen, so erhalten wir erst dann einen zweiten Funken, wenn wir den Entlader bis auf eine etwa 13 mal geringere Distanz nähern. Diese zweite Entladung nennt man „Entladungsrest“. Wenn wir aber beide Belegungen mittels des Entladers in leitende Verbindung gebracht haben, so dass kein Entladungsrest übrig bleiben kann, so brauchen wir nur noch einige Zeit zu warten, um abermals eine Entladung vornehmen zu können, und diese bezeichnet man als den „elektrischen Rückstand“.

Apparate zur Elektricitätserzeugung. Schon Guericke dachte (1663) daran, eine Maschine zu construieren, mit deren Hilfe man dauernd Elektricität erzeugen könnte. Er ließ zu diesem Zwecke eine Schwefelkugel um eine Achse rotieren und rieb sie dabei mit der Hand. Die leicht zerbrechliche Schwefelkugel wurde später durch eine Glaskugel ersetzt, und im Jahre 1766 construierte Planta die erste Scheibenmaschine. Bei der noch vielfach gebräuchlichen Winter'schen Elektrisiermaschine wird von beiden Seiten gegen die rotierende Glasscheibe das mit Amalgam bestrichene Reibzeug durch Federn angedrückt und damit das Glas elektrisiert. Die auf den frisch geriebenen Stellen der Scheibe befindliche, positive Ladung wird durch die Spitzenwirkung des Saugkammes K abgenommen und dem „Conductor“ zugeführt. Auch das negativ elektrisierte Reibzeug steht mit einem Conductor in Verbindung. Solange beide Conductoren isoliert bleiben, erhält man nur schwache, knisternde, violette Funken, wenn man denselben den Fingerknöchel nähert; viel lebhafter werden dieselben bereits, wenn man den einen Conductor mit dem Erdboden verbindet, also z. B. mit einer Gas- oder Wasserleitung in metallische Berührung bringt. Eine weitere Steigerung erzielt man dadurch, dass man zwischen dem negativen Conductor und dem Funkenzieher F eine leitende Verbindung herstellt. (Fig. 176.) Die stärksten Entladungen, wenn auch mit kürzeren Funken,

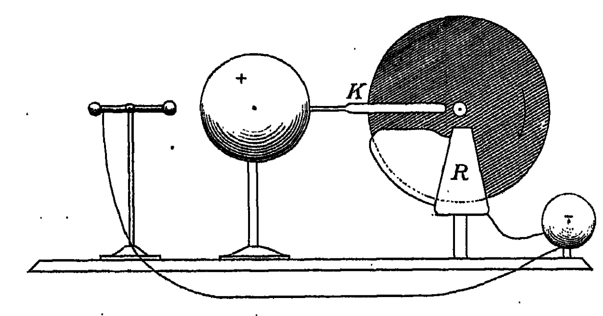


Fig. 176.

stellen sich ein, wenn man die entwickelten Elektricitätsmengen zur Ladung einer größeren Leydnerflasche verwendet und letztere mit den Conductoren der Elektrisiermaschine verbindet.

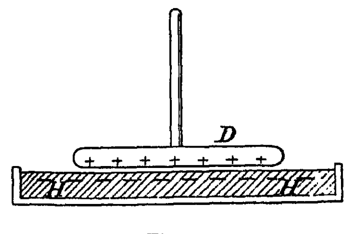


Fig. 177.

Obwohl schon 13 Jahre früher von Wilke erfunden, wurde der Elektrophor erst von Volta um das Jahr 1775 zur Erzeugung größerer Elektricitätsmengen verwendet. Der in eine Metallform gegossene Harzkuchen H (Fig. 177) besteht meist aus Kolofonium, dem etwas Terpentin zugesetzt wurde, um zu verhindern, dass er spröde wird. Den Harzkuchen kann man auch durch eine Hartgummiplatte ersetzen. Nachdem der Harzkuchen mit Pelzwerk kräftig gepeitscht worden ist, setzt man auf den-

selben den mit einem isolierenden Griff versehenen Metalldeckel; dieser berührt den Harzkuchen nur an wenigen Stellen, während der größte Theil seiner Oberfläche vom Harzkuchen durch eine sehr dünne Luftschichte getrennt ist. Sobald man also den Deckel mit dem Finger ableitend berührt, entweicht die durch Influenz entstandene, negative Ladung, die positive wird durch die negative Ladung des Harzkuchens gebunden und nimmt zugleich wegen der Nähe der negativen Ladung ein sehr niederes Potential an. Wenn wir dann den Deckel isoliert abheben, so wird diese positive Ladung frei, und ihr Potential nimmt zugleich einen sehr hohen Wert an. Dabei ist dem Harzkuchen seine Ladung nicht entzogen worden, wie es bei der Glasscheibe der Elektrisiermaschine geschieht. Das mechanische Äquivalent der hier gewonnenen elektrischen Energie ist die Arbeit, welche wir beim Heben des Deckels leisten müssen, um die sich gegenseitig anziehenden Elektricitäten voneinander loszureißen. Man kann also dem Elektrophor fast unbegrenzte Elektricitätsmengen entnehmen, ohne seine eigene Ladung zu erschöpfen, da ja die gewonnenen Ladungen durch Influenz zustande kommen.

Der elektrostatische Multiplicator. Auf die Metallplatten M_1 und M_2 (Fig. 178) der beiden Elektroskope A und B legen wir je ein Glimmerblatt als Isolator und auf diese die mit isolierenden Griffen versehenen Metallplatten P_1 und P_2, wodurch wir also zwei Condensatoren erhalten. Wir nehmen dann P_1 ab und berühren damit die Platte M_2, während wir zugleich die Platte P_2 zur Erde ableiten; dadurch wird dieser Condensator geladen, falls auf P_1 eine wenn auch noch so kleine Ladung vorhanden war. Die schon früher auf den Belegungen des Elektroskopes A vorhandenen Ladungen können wir in der Weise noch vermehren, dass wir die Platte P_2 mit M_1 in Berührung bringen und zugleich die freie Elektricität von P_1 zur Erde ableiten. Durch öftere Wiederholung dieser beiden Operationen können wir es dahin bringen, dass eine ursprünglich kaum wahrnehmbare Ladung in einem der beiden Elektroskope soweit gesteigert wird, bis schließlich die Blättchen beider Elektroskope stark divergieren.

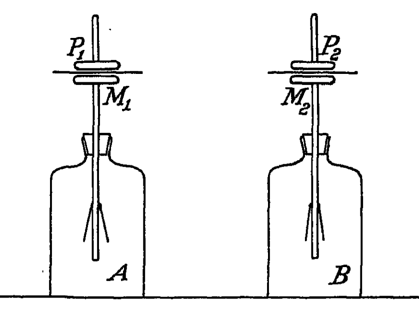


Fig. 178.

Wie die Scheibenmaschine es ermöglicht, continuierlich durch Reibung Elektricität zu erzeugen, so können wir auch das eben beschriebene Multiplicationsverfahren durch einen Mechanismus besorgen lassen, um fortwährend neue Elektricitätsmengen zu erhalten, und dies geschieht durch den von W. Thomson erfundenen R e p l e n i s h e r (Fig. 179). Um die verticale Achse O dreht sich das Ebonitstück HH, das zwei Metallplatten M_1 und M_2 trägt, welche zwei Theile eines Cylindermantels bilden. Auch die beiden feststehenden

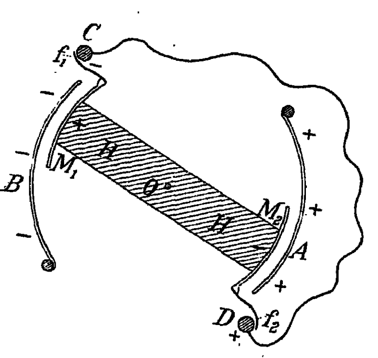


Fig. 179.

Metallplatten A und B haben dieselbe Gestalt und sind isoliert auf einem Stativ angebracht. War anfangs die Platte A positiv und B negativ geladen, so wirken diese Ladungen vertheilend auf M_1 und M_2, und die an denselben angebrachten Federn f_1 und f_2 ermöglichen es, dass sich ihre freien Elektricitäten durch die Leitung zwischen C und D gegenseitig ausgleichen. Im Verlaufe der weiteren Drehung werden dann die negative Ladung auf M_2 und die positive auf M_1 frei und durch die Federn an die Träger der Platten A und B abgegeben, deren Potential mit jeder neuen Berührung steigt. Auch bei diesem Apparate kann man wie beim Multiplicationsverfahren mit Hilfe ganz unmerklicher, elektrischer Ladungen sehr bald starke Potentialunterschiede hervorrufen, als ob man eine „selbsterregende“ Elektrisiermaschine vor sich hätte.

Die Elektricitätserzeugung bei der Influenzmaschine unterscheidet sich von der beim Replenisher nur dadurch, dass hier die bei letzterem getrennt wiederkehrenden Vorgänge continuierlich stattfinden. Mit Hilfe einer Transmission TT (Fig. 180) wird die Glasscheibe S_2 um die Achse PQ in Drehung versetzt. Die Belegung B_2 wird durch eine geriebene Ebonitplatte mit negativer Elektricität geladen; die durch Influenz im Saugkamme K_2 auftretende positive Ladung strömt jetzt durch die Spitzen auf die sich drehende Scheibe über und gelangt so zum Ausschnitt links; die in diesen Ausschnitt hineinragende Spitze der Belegung B_1 nimmt dann von der Scheibe eine positive Ladung auf, und zugleich strahlt der Saugkamm K_1 negative Elektricität auf die Scheibe S_2 aus, wenn die beiden Conductoren C_1 und C_2 miteinander in Berührung stehen. Von dieser Stelle weg setzt die rasch rotierende Scheibe ihren Weg mit einer negativen Ladung fort, bis sie beim früheren Ausschnitte abermals die Elektrisierung wechselt. Dabei strömt fortwährend positive Elektricität von C_1 nach C_2 und setzt ihre Bewegung noch in Gestalt eines Funkenstromes fort, wenn wir diese beiden Conductoren voneinander trennen. Die ersten Influenzmaschinen wurden von Töpler und Holtz im Jahre 1864 construiert. Bei den sogenannten selbsterregenden Influenzmaschinen ist das Constructionsprincip des Replenishers mit dem der Influenzmaschine vereinigt.

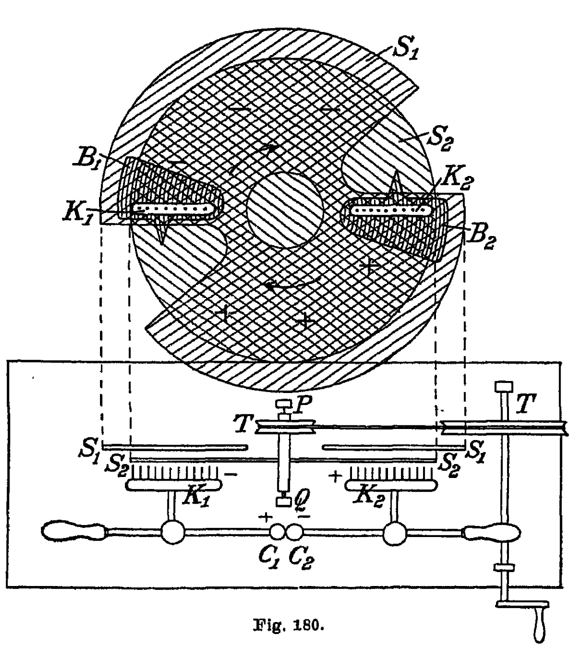


Fig. 180.

Elektrische Entladungserscheinungen. Das mit einem knisternden Geräusch verbundene Überspringen eines Funkens zwischen zwei Leitern ist wohl das bezeichnendste Merkmal für den elektrischen Zustand derselben. Während der von einem isolierten

Conductor auf den Fingerknöchel überspringende Funken nur einen momentanen, localen Schmerz an der getroffenen Stelle hervorruft, verursacht die Entladung einer Leydnerflasche in den Gelenken einen krampfhaften Zustand. Sehr starke Entladungen wirken auch lähmend auf die Athmungsorgane und können unter Umständen tödtlich werden.

Schwächere Funken sind geradlinig und haben ein röthlich violettes Licht; in der Nähe des positiven Conductors zeigen sie meist eine stärker leuchtende Stelle. Bei größeren Entfernungen zeigt sich eine Zersplitterung des Funkens in der Richtung gegen den negativen Pol (Fig. 181). Ob zwischen zwei Conductoren bei einer bestimmten Potentialdifferenz ein Funken überspringt, das hängt außer von der Spannungsdifferenz noch von der Form der Conductoren, von der Beschaffenheit ihrer Oberfläche, von den Eigenschaften des vom Funken durchbrochenen Mediums und noch anderen Umständen ab; selbst die Beleuchtung des Conductors mit verschiedenen Lichtarten ist für die Auslösung der Funken so einflussreich, dass man das Einsetzen und Unterbrechen des Funkenstromes dadurch regulieren kann.

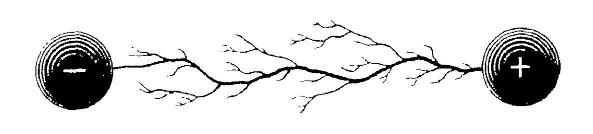


Fig. 181.

Wenn man in einem dunkeln Raume eine rasch rotierende Scheibe durch die Funken einer größeren Leydnerflasche beleuchtet, so scheinen die auf ihr gezeichneten Figuren stillzustehen, da sich die Scheibe während der Beleuchtungsdauer nicht merklich weiterbewegt und das erhaltene Lichtbild stark genug ist, um eine länger andauernde Lichtempfindung hervorzurufen. Trotz der kurzen Dauer dieser Lichtwirkung ist dieselbe nicht auf eine einzige Entladung zurückzuführen; genauere Untersuchungen haben vielmehr ergeben, dass es sich dabei immer um die Gesammtwirkung von vielen Tausenden einzelner Entladungen handelt, bei welchen jedesmal die Entladungsrichtung wechselt. Man bezeichnet daher die Entladung der Leydnerflaschen als o s c i l l a t o r i s c h, da wir annehmen müssen, dass dabei die Elektricität pendelartig längere Zeit zwischen mehreren Ladungsformen hin- und herschwankt, ehe sich ein neues elektrostatisches Gleichgewicht einstellt.

Wenn die beiden Belegungen einer Leydnerflasche durch eine mehrfach unterbrochene Leitung entladen werden, so treten die Funken nicht an allen Stellen gleichzeitig auf, sondern es vergeht eine gewisse Zeit, bis sich diese Störung des elektrostatischen Gleichgewichtes durch einen Draht von einer bestimmten Länge fortgepflanzt hat. Die Entladung pflanzt sich also in einem linienförmigen Leiter mit einer gewissen Geschwindigkeit fort. Wheatstone hat diese Geschwindigkeit im Jahre 1834 mit Hilfe eines rotierenden Spiegels bestimmt (Fig. 182). Die Belegungen des Condensators L führten zu den Conductoren 1 und 6, und zwischen den Conductoren 2 und 3 einerseits und 4 und 5 andererseits befand sich je ein 402 m langer Leitungsdraht. Wurde hinter diesen drei Funkenstrecken ein drehbarer Spiegel S aufgestellt, so erschienen bei jeder Entladung die drei Funken als gleichzeitig auftretende Lichtpunkte, wenn der Spiegel still stand; als er sich aber mit einer Geschwindigkeit von etwa 800 Umdrehungen in der Secunde drehte, erschienen die früheren Punkte als Linien, und das Bild des mittleren Funkens war gegen die beiden anderen um ein bestimmtes Stück verschoben. Da die Lichtpunkte im rotierenden Spiegel als Linien erschienen, so musste sich derselbe während der

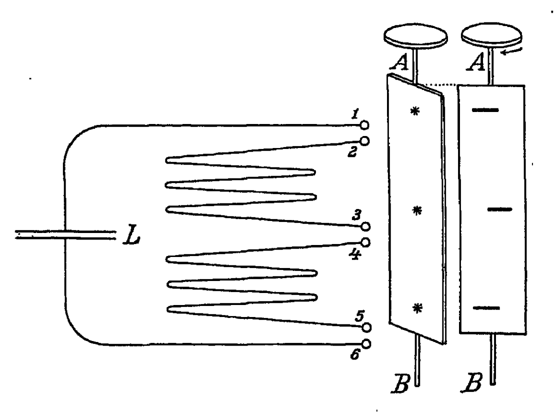


Fig. 182.

Dauer der Entladung gedreht und daher die Entladung eine gewisse Zeit in Anspruch genommen haben, die sich aus der Länge des Lichtstreifens und aus der Drehungsgeschwindigkeit des Spiegels berechnen ließ. Die Verschiebung der mittleren Linie gegen die beiden anderen ist eine Folge der Verspätung, welche die Entladung durch ihre Fortpflanzung in dem 402 m langen Drahte erlitten hat.

So ergab sich, dass sich das Licht mit seiner Geschwindigkeit von 300.000 (km sec^{-1}) ungefähr ebenso schnell fortpflanzt, wie die elektrischen Entladungen. Daraus hat man sofort den Schluss gezogen, dass diese Übereinstimmung keine zufällige sei, sondern darin ihren Grund habe, dass zwischen den elektrischen und den Lichterscheinungen ein innerer Zusammenhang bestehe, und diese Vermuthung ist später durch viele andere Entdeckungen bestätigt worden.

Mit den elektrischen Entladungen sind Wirkungen verbunden, die den verschiedensten Gebieten der Physik angehören. Der Funken einer großen, sehr stark geladenen Leydnerflasche vermag eine Glasscheibe zu durchbrechen. Ein Kartenblatt, das vom elektrischen Funken durchbohrt wurde, zeigt auf beiden Seiten aufgerissene Ränder, wie eine von Gewehrkugeln durchschossene weiche Thonwand, welche die Kugeln nur in einer Richtung passierten. Nebst diesen mechanischen Wirkungen treten die thermischen Wirkungen besonders in den Vordergrund; mit Hilfe des elektrischen Funkens kann man z. B. Knallgas, Schwefeläther und Schießpulver zur Entzündung bringen. Die optischen Wirkungen treten hauptsächlich in der Lichterscheinung des elektrischen Funkens zu Tage; die in den Geissler'schen Röhren eingeschlossenen, stark verdünnten Gase leuchten schon bei sehr schwachen Entladungen ihrer ganzen Ausdehnung nach momentan auf und verbreiten dabei ein Licht, dessen Farbe von der chemischen Beschaffenheit des leuchtenden Gases abhängt.

Das mit kleineren oder größeren Funkenentladungen verbundene Knistern oder Krachen beweist, dass die Luft dabei eine mechanische Erschütterung erleidet.

Der Blitz. Schon im Jahre 1698 sprach Dr. Wall in einer englischen Zeitschrift die Vermuthung aus, dass die Erscheinungen beim Reiben eines Harzstabes mit Wollenzeug, nämlich die kleinen Lichtfunken und das damit verbundene Knistern an Blitz und Donner erinnern, und diese Ansicht vertraten auch viele andere Physiker vor Benjamin Franklin. Dieser aber veranlasste den entscheidenden Versuch. Auf seine Anregung hin hat Dalibard in der Nähe von Paris eine ungefähr 10 m hohe Eisenstange errichtet, aus der man große Funken ziehen konnte. Später ließ Franklin beim Herannahen eines Gewitters einen Drachen steigen und erhielt ebenfalls aus der Schnur sehr große Funken, sobald dieselbe vom Regen durchnässt worden war. In Deutschland hat zuerst Winkler den Gedanken ausgesprochen, dass man sich durch eine Ableitungsstange vor den gefährlichen Wirkungen des Blitzes schützen könne, und der Pfarrer Divisch von Brenditz bei Znaim führte diesen Gedanken zuerst im Jahre 1754 praktisch aus.

Die Wirkungen der blitzförmigen Entladungen der Luftelektricität sind außerordentlich verschieden und führen manchmal nur zu mechanischen Zerstörungen, manchmal herrschen die thermischen Wirkungen vor und können selbst bei ausgedehnten Holzmassen mit unglaublicher Geschwindigkeit den Verbrennungsprocess einleiten. Auch die Wirkung auf den menschlichen Körper ist oft sehr verschieden und führt, wo sie nicht tödtlich ist, häufig zu vorübergehenden Lähmungen. Bei der Construction von Blitzableitern kommt es hauptsächlich auf eine gute Verbindung mit der Erde an, die am besten durch den Anschluss an ein ausgedehntes metallisches Röhrennetz, z. B. einer Wasserleitung, erzielt wird. Insbesonders bedürfen Telegraphen-, Telephon- und längere Starkstromleitungen eigener Blitzschutzvorrichtungen, da sie oft Landgebiete leitend miteinander verbinden, in welchen die atmosphärische Elektricität sehr verschieden stark auftritt.

Quellen der Elektricität. Um die Grunderscheinungen der Elektricität zu erforschen, haben wir Harz und Glas durch Reiben in den elektrischen Zustand versetzt. Man bezeichnet daher die auf diesem Wege gewonnene Elektricität als Reibungselektricität. Auch durch Influenz erzielt man starke Elektrisierungen, und es ist wohl nur diesem Umstande zu verdanken, dass überhaupt dieses Gebiet von Naturkräften entdeckt und einer unerschöpf-

lichen Ausbeute zugeführt wurde. Es gibt aber noch andere Mittel, um Elektricität, wenn auch nicht mit so großen Spannungsdifferenzen, so doch in viel größerer Menge zu erhalten.

Wenn man einen Turmalinkrystall in der Richtung seiner Hauptachse zusammendrückt, so nehmen seine Endflächen entgegengesetzt bezeichnete Ladungen an. Diese durch Druck hervorgerufene Elektricität bezeichnet man als Piëzoelektricität. Der Turmalin kommt in hexagonalen Krystallen vor, die aus dreikantigen Prismen bestehen und an beiden Enden mit dreikantigen Pyramiden abschließen (Fig. 183). Letztere sind aber, in der Richtung der Achse betrachtet, um 60⁰ gegen einander verschoben, sodass die Seitenflächen der Krystalle auf der einen Seite giebelförmig, auf der anderen senkrecht abgeschlossen sind. Das erstere Ende A bezeichnet man als das antiloge Ende, das letztere als das analoge; ersteres wird beim Drucke positiv, letzteres negativ elektrisch. Wenn dann der Druck nachlässt oder statt dessen Zugkräfte angewendet werden, so wird das antiloge Ende negativ, und das analoge Ende positiv elektrisch.

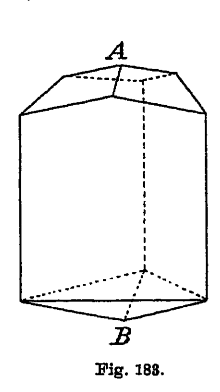


Fig. 183.

Eine ähnliche Erscheinung zeigt sich, wenn man den Turmalinkrystall erwärmt oder abkühlt. Die bei der Erwärmung auftretende Elektricität nennt man Pyroelektricität. Dabei wird das analoge Ende durch Erwärmung negativ und das antiloge positiv elektrisch, was mit der Erscheinung der Piëzoelektricität insoferne übereinstimmt, dass die Erwärmung mit einer Ausdehnung verbunden ist, die auf den Krystall im Sinne einer Zugkraft wirkt. Beim Abkühlen zieht sich dann der Krystall wieder zusammen, und zugleich tritt dieselbe Wirkung ein, wie wenn auf den Krystall in der Richtung der Achse ein Druck ausgeübt worden wäre.

Viel wichtiger als alle bisher angeführten Elektricitätsquellen sind die folgenden. Wenn man zwei verschiedenartige, unelektrische Leiter miteinander in Berührung bringt, so nehmen sie sofort ein verschiedenes Potential an. Eine ähnliche Spannungsdifferenz tritt auch auf, wenn sich ein fester Leiter in einem flüssigen Leiter löst.

Mit der Wirkung der dadurch hervorgerufenen, elektrischen Strömungen werden wir uns in der Lehre vom Galvanismus befassen.

Elektrische Spannungen treten ferner auf, wenn die Berührungsstellen derselben Leiterpaare auf verschiedene Temperaturen gebracht werden. Mit dieser Erscheinung werden wir uns in der Lehre von der Thermoelektricität näher beschäftigen. Die industriell wichtigste Elektricitätserregung ist aber die, wenn ein stabförmiger Leiter in einem magnetischen Felde so bewegt wird, dass er die Kraftlinien durchschneidet; dabei treten an seinen Endpunkten Potentialdifferenzen auf, und diese Art von Elektricitätserregung nennt man elektromagnetische Induction.

Auch bei den Lebensfunctionen des menschlichen und thierischen Körpers spielen elektrische Ströme in den Nerven und Muskeln eine wichtige Rolle. Manche Thiere, wie der Zitterrochen, Zitterwels und der Zitteraal besitzen sogar die Fähigkeit, willkürlich elektrische Entladungen in der nächsten Umgebung ihres Körpers hervorzurufen, da sie eigene Organe besitzen, welche zur Erzeugung und zum Ansammeln der nöthigen Elektricitätsmengen dienen.

Das Wesen der Elektricität. Zur Zeit Franklins interessierte man sich viel um die Lösung der Frage, ob die beiden Arten von elektrischen Ladungen als zwei verschiedene „Fluida" aufzufassen seien, die, in einem Körper in gleichen Mengen vereinigt, ihn unelektrisch machen und, einzeln auftretend, den Charakter einer positiven oder negativen Ladung annehmen. Diese Ansicht vertrat zuerst Robert Summer. Franklin stellte dieser Ansicht die „unitarische" Theorie gegenüber, dass es nur ein Fluidum gebe, das in jedem Körper in einer gewissen Menge vorhanden sei, und bei einem Überschusse als positive Elektricität erscheine, während die negativ elektrische Ladung auf einen Mangel hindeute. Eine unbedingt entscheidende Lösung ist bis heute noch nicht erfolgt. Obwohl man schon seit langer Zeit im Allgemeinen der Anschauung Franklins huldigt, spricht man doch noch immer von einer positiven und von einer negativen Elektricität, ohne damit sagen zu wollen, dass es sich dabei wirklich um zwei verschiedene Fluida handle, vielmehr tritt immer mehr die Erkenntnis in den Vordergrund, dass alle elektrischen und magnetischen Erscheinungen auf Wirkungen des Lichtäthers zurückzuführen sind. Dies ergibt sich nicht nur aus der innigen Wechselbeziehung zwischen dem Magnetismus und den elektrischen Strömen, sondern noch vielmehr aus ihrem Zusammenhange mit vielen optischen Erscheinungen.

Der galvanische Strom.

Berührungs- oder Contactelektricität. Der Professor der Medicin an der Universität Bologna, Aloisio Galvani, beschäftigte sich auch mit elektrischen Versuchen und bemerkte dabei im Jahre 1790 wie frisch präparierte Froschschenkel, die mittelst Kupferdrähten an einem Eisengitter aufgehängt waren, bei jeder Entladung der Elektrisiermaschine in Zuckungen geriethen. Über den Grund dieser Erscheinung wurden damals die verschiedensten Vermuthungen ausgesprochen und insbesondere die Frage erörtert, ob sie einer thierischen Elektricität, der Luftelektricität oder irgend einer anderen Ursache zuzuschreiben sei.

Alessandro Volta aus Como war nun der glückliche Forscher, der in der Flut der sich daran knüpfenden Untersuchungen den richtigen Gedanken aufgriff und denselben beharrlich verfolgend zum Begründer des wissenschaftlich behandelten „Galvanismus" wurde. Er verwies auch schon auf den Zusammenhang der neuentdeckten Elektricitätsquelle mit der von Professor Sulzer in Berlin im Jahre 1760 gemachten Beobachtung, dass ein Blei- und Silberstück unter sich und mit der Zunge in Berührung gebracht, eigenthümliche Geschmacksempfindungen hervorrufen, und constatierte mit dem von ihm construierten Condensator und Elektroskope, dass bei der gegenseitigen Berührung verschiedener Metalle unter sich und mit Flüssigkeiten eine elektrische Spannung auftrete. Diese „Berührungselektricität" kann nachgewiesen werden, indem man auf eine sorgfältig isolierte Kupferplatte ein sehr dünnes Glimmerblatt legt und auf dieses eine Zinkplatte setzt. (Fig. 184.) Wenn man dann beide Platten mit einem isoliert gehaltenen Kupfer- oder Zinkbügel berührt und zugleich mit einem sehr empfindlichen Elektroskope oder

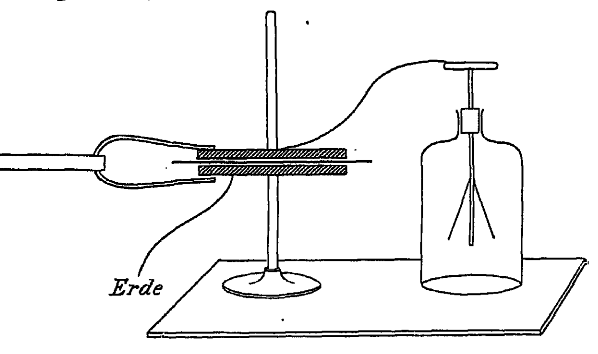


Fig. 184.

mit dem Thomson'schen Quadrantenelektrometer verbindet, so zeigt sich beim isolierten Aufheben der oberen Platte, diese wie auch die untere elektrisch, und zwar die Zinkplatte positiv, die Kupferplatte negativ. Für diese bei der Berührung auftretenden Elektricitäten lassen sich die folgenden Gesetze feststellen.

Ordnen wir die wichtigsten Elektricitätserreger oder Elektromotoren zur sogenannten Volta'schen Spannungsreihe: Aluminium, Zink, Zinn, Blei, Antimon, Wismut, Neusilber, Messing, Quecksilber, Eisen, Kupfer, Silber, Gold, Kohle, Platin, Braunstein, so gelten für dieselbe folgende Regeln:

1. Jedes vorausgehende Element wird bei der Berührung mit einem der folgenden positiv, letzteres negativ elektrisch.

2. Die Spannung, die zwischen zwei nicht unmittelbar aufeinander folgenden Elementen auftritt, ist gleich der Summe der Spannungen, die zwischen allen dazwischen liegenden Paaren von Elektromotoren auftritt.

Diese Spannungsunterschiede sind aber im Vergleiche zu den früher benützten Potentialunterschieden sehr gering; sie ist z. B. zwischen Zink und Kupfer in der erst später definierbaren Einheit „Volt" gemessen 0·89, während die beim Reiben einer Harzstange erregten Spannungen schon nach Tausenden von Volt zählen können. Daher lässt sich diese Contactspannung nur dadurch nachweisen, dass man einen Condensator von sehr großer Capacität damit ladet und dann die Belegungen auseinander nimmt, wodurch die Capacität sehr vermindert und die Spannung ebenso vielmal gesteigert wird. Dabei gelangen wir aber immer nur zu elektrostatischen Spannungen, die nach dem Ausgleiche durch einen Leiter vollständig verschwinden und daher nicht geeignet sind, dauernd größere Elektricitätsmengen in Bewegung zu versetzen.

Verbinden wir (Fig. 185 a) die bei C sich berührenden Drähte aus Kupfer und Zink mit einem Kupferdrahte AB, so erhalten wir bei A keine, bei B aber eine ebenso starke Spannungsdifferenz entgegengesetzten Zeichens wie bei C, und daher kann die Elektricität im ganzen Leiterkreise ABC

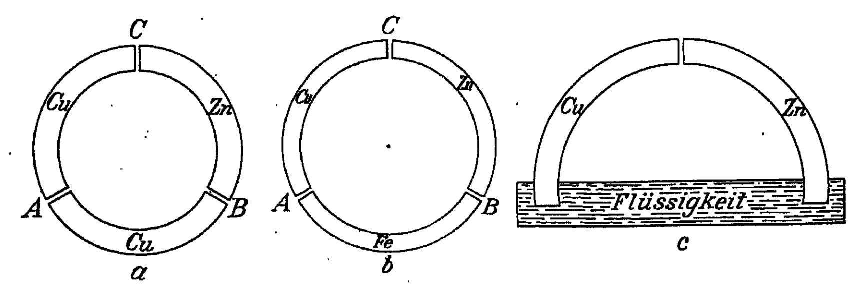


Fig. 185.

nicht in Bewegung gerathen. Verwenden wir hierauf zur Verbindung von A mit B einen Eisendraht (Fig. 185 b), so erhalten wir allerdings drei verschiedene Contacte, aber die Spannung zwischen Kupfer und Zink ist jetzt genau so groß wie die zwischen Zink und Eisen mehr der zwischen Eisen und Kupfer und hat die entgegengesetzte Richtung; diese drei elektromotorischen Kräfte heben sich also wieder gegenseitig auf. Daraus folgt, dass es überhaupt unmöglich ist, mit Hilfe dieser Elektromotoren erster Classe in einem geschlossenem Leiterkreise eine Spannungs-

differenz hervorzurufen und dadurch die Elektricität in eine fließende Bewegung zu bringen.

Die Elektrisierung durch Berührung stellt sich auch ein, wenn man ein Metall in eine leitende Flüssigkeit eintaucht. Nach Buff, kann man die dadurch hervorgerufenen Ladungen in der Weise nachweisen, dass man auf die Glimmerplatte, nicht, wie beim letzten Versuche, ein zweites Metall, sondern ein mit der betreffenden Flüssigkeit befeuchtetes Papier legt und dasselbe durch einen isolierten Draht mit der darunter befindlichen Condensatorplatte in Verbindung bringt. Beim Abheben der Glimmerplatte zeigt dann die untere Platte jene Ladung, welche das in die Flüssigkeit getauchte Metall angenommen hat.

Aus diesem Versuche ergibt sich, dass sowohl Kupfer wie auch Zink bei der Berührung mit verdünnter Schwefelsäure negativ, diese aber positiv elektrisch wird. Würde bei der Berührung der Metalle mit der Flüssigkeit keine Contactelektricität auftreten, so müsste die Elektricität vom Zink durch die Flüssigkeit zum Kupfer fließen, wenn wir die beiden Metallenden, wie es Fig. 185 c zeigt, in die verdünnte Schwefelsäure tauchen. Wenn dagegen zwischen *Zn* und *Cu* kein Spannungsunterschied auftreten würde, so müsste ein elektrischer Strom vom Kupfer zum Zink fließen, weil das Zink bei der Berührung mit verdünnter Schwefelsäure etwa viermal stärker negativ elektrisch wird als das Kupfer. Diese beiden elektromotorischen Kräfte heben sich also nicht auf, wie es bei der Verbindung mit Eisen der Fall war. Weil das Zink bei jeder Berührung mit Schwefelsäure negativ elektrisch wird, so müssten wir letztere in der Spannungsreihe vor das Zink setzen. Andererseits müsste aber das Kupfer der Schwefelsäure näher stehen als das Zink, weil letzteres stärker elektrisch wird. Daraus folgt, dass sich die Schwefelsäure in die Spannungsreihe nicht einschalten lässt, ohne gegen die Grundsätze zu verstoßen, nach denen sie aufgestellt ist. Man bezeichnet daher die Flüssigkeiten zum Unterschiede von den Elektromotoren erster Classe, die den Gesetzen der Spannungsreihe genügen, als Elektromotoren zweiter Classe. Bei letzteren gilt also gerade jenes Gesetz nicht, welches bei ersteren die Herstellung einer ständigen Potentialdifferenz in einem geschlossenen Leiterkreise verhindert hat.

Tauchen wir in ein mit verdünnter Schwefelsäure gefülltes Glasgefäß eine Zink- und eine Kupferplatte, so zeigt das Kupfer ein höheres Potential als das Zink, d. h. wenn wir beide Platten mit den Quadrantenpaaren eines Elektrometers verbinden und das Zink an Erde legen, so erscheint das Kupfer positiv; wenn wir aber dieses an Erde legen, so erscheint das Zink negativ elektrisch. Diese beiden, nur durch die verdünnte Schwefelsäure mit einander in Verbindung stehenden Metallplatten bilden ein einfaches galvanisches Element. Aus mehreren solchen Elementen oder Zellen baute Volta seine „pila a corona di tazze“, indem er die Kupferplatte des ersten Elementes mit der Zinkplatte des zweiten, dessen Kupferplatte wieder mit der Zinkplatte des dritten Elementes u. s. w. verband, wodurch die Gesammtspannung an den Polen der „Batterie“ so vielmal größer wurde, als bei der Batterie Elemente in Anwendung kamen. Dieselbe Wirkung erzielt man auch, wenn man der Reihe nach eine Zinkplatte, einen mit verdünnter Schwefelsäure getränkten Tuchlappen, dann eine Kupferplatte, hierauf wieder eine Zinkplatte, das Tuchstück und die Kupferplatte u. s. w. übereinanderschichtet, die zusammen die sogenannte „Volta'sche Säule“ bilden.

Schneidet man aus falschem Gold- und Silberpapier kreisrunde Stücke aus und klebt man je ein Stück Gold- und Silberpapier mit der Papierseite aneinander, so erhält man die sogenannte Zambonische Säule, indem man die Papierstücke so übereinander schichtet, dass die aus Kupfer und Zink bestehenden Metallseiten sich berühren. Auf diesem Wege lässt sich leicht eine sehr große Anzahl von Elementen zur Verstärkung der Wirkung vereinigen. Diese Säule wird zur Construction des Fechnerschen Elektroskopes benützt (Fig. 186). Bei diesem Elektroskop wird ein zwischen den Polen hängendes Aluminiumblättchen vom positiven Pole angezogen, wenn es durch Influenz oder Berührung negativ elektrisiert wird. Wegen seiner großen Empfindlichkeit kann man es mit Vortheil zum Nachweise der Contactelektricität benützen.

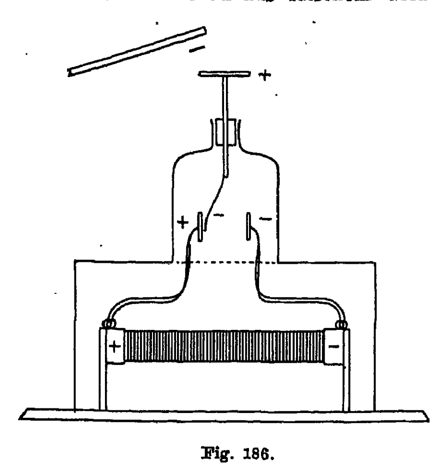


Fig. 186.

Wenn man die Pole einer galvanischen Batterie, die aus einer größeren Anzahl von Zellen besteht, miteinander in Berührung bringt und dann die schon geschlossene Leitung wieder unterbricht, so zeigt sich ein kleiner elektrischer Funken. Verbindet man den einen Pol mit einer Eisenfeile und streicht man mit einem zum anderen Pole führenden Eisendrahte über dieselbe, so stellt sich ein ganzer Sprühregen von Funken ein, die aber nur dadurch zustande kommen, dass beim vorübergehenden Stromschluss sehr kleine Eisentheilchen ins Glühen kommen; diese Erscheinung ist daher vielmehr als Wärmewirkung anzusehen. Eine solche erhält man auch, indem man einen sehr dünnen Blumendraht zwischen die Pole der Batterie schaltet; bei passender Länge wird er durch den Strom bis zur Gluthitze erwärmt. Wenn man mit den befeuchteten Händen die beiden Pole einer stärkeren Batterie anfasst und der Strom wird an irgend einer Stelle unterbrochen, so fühlt man eine ähnliche Wirkung, wie bei der Entladung einer Leydnerflasche; der Strom bringt also auch physiologische Wirkungen hervor. Mit den mechanischen und magnetischen Wirkungen solcher Ströme werden wir uns später eingehend befassen.

Die bisher besprochenen Erscheinungen der Berührungselektricität erklären uns nur das Auftreten einer bestimmten Potentialdifferenz; den Wirkungen des elektrischen Stromes, der ja bedeutende mechanische, thermische und chemische Arbeitsleistungen hervorzubringen vermag, muss aber nach dem Grundsatze von der Erhaltung der Arbeit ein gewisses Äquivalent entsprechen, und dieses finden wir beim galvanischen Elemente in den chemischen Vorgängen.

Die chemischen Wirkungen des elektrischen Stromes. Leitet man mit Hilfe des Apparates (Fig. 187) einen hinreichend starken Strom durch verdünnte Schwefelsäure, so scheidet sich an der Stelle, wo der Strom durch ein Platinblech in die Flüssigkeit eintritt, Sauerstoff und am anderen Platinbleche Wasserstoffgas aus. Abgesehen von den charakteristischen, chemischen Eigenschaften erkennt man den ausgeschiedenen

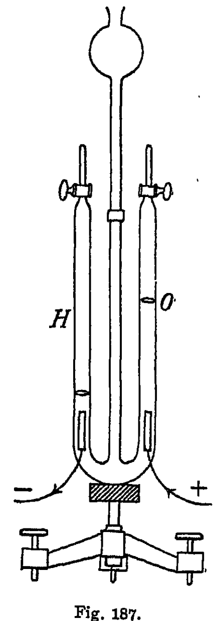


Fig. 187.

Wasserstoff daran, dass er dem Volumen nach ungefähr in der doppelten Menge auftritt.

Das mit dem positiven Pole der Batterie verbundene Platinblech bezeichnet man als Anode, das mit dem negativen Pole verbundene als Kathode. Durch erstere tritt der Strom in den Elektrolyten, d. h. in die den Strom leitende und dadurch zersetzte Flüssigkeit ein, durch letztere verlässt er sie, um dann durch die Leitung wieder zur Batterie zurückzukehren.

Benützen wir als Elektrolyten eine Lösung von Kupfervitriol und als Elektroden, d. h. als Anode und Kathode je eine Kupferplatte, so haben wir damit ein Voltameter zusammengestellt, und wenn wir durch längere Zeit einen elektrischen Strom durch dasselbe hindurchfließen lassen, so zeigt sich bald, dass die als Anode dienende Kupferplatte einen Gewichtsverlust erlitten hat, während an der Kathodenplatte ebensoviel metallisches Kupfer ausgeschieden werde.

Beim Silbervoltameter gibt man in eine Platinschale salpetersaures Silber und senkt in dasselbe einen Silberstab als Anode, während die Schale selbst als Kathode dient. Leitet man durch den Apparat einen elektrischen Strom, so schlägt sich an der Platinschale das Silber nieder, und zugleich geht von der Anode ebensoviel Silber in Lösung.

Michael Faraday, der hervorragendste Begründer der neueren Elektricitätslehre, stellte im Jahre 1833 über den Zusammenhang zwischen der Masse des zersetzten Elektrolyten und der Elektricitätsmenge, welche die Zersetzung hervorruft, folgende Gesetze auf:

1. Gleiche Elektricitätsmengen zersetzen gleiche Massen des Elektrolyten. Nach dem Gesetze der constanten Zusammensetzung der chemischen Verbindungen müssen daher auch die ausgeschiedenen Zersetzungsproducte der zersetzenden Elektricitätsmenge proportional sein. So oft also in einem Kupfervoltameter an der Kathode 1 g Kupfer ausgeschieden wird, ist durch den Elektrolyten jedesmal dieselbe Elektricitätsmenge hindurchgeflossen.

Werden in gleichen Zeiten gleiche Mengen Kupfer ausgeschieden, so müssen also auch in gleichen Zeiten gleiche Elektricitätsmengen durch die Zersetzungszelle geflossen sein, und dann spricht man von einem constanten elektrischen Strome. Unter dieser Annahme ist die Masse des in der Zeiteinheit ausgeschiedenen Zersetzungsproductes der Stromstärke proportional.

2. Fließt ein und derselbe Strom durch mehrere Zersetzungszellen, so sind die in gleichen Zeiten ausgeschiedenen Zersetzungsproducte chemisch äquivalent. So scheidet z. B. ein gewisser Strom während einer Stunde in einem Silbervoltameter 4·025 g Silber, und dann noch durch ein Kupfervoltameter fließend in diesem 1·182 g Kupfer aus. Da das Silber chemisch einwertig, das Kupfer aber zweiwertig ist, so verhalten sich diese Beträge wie das doppelte Atomgewicht des Silbers zu dem des Kupfers, denn es ist

$$4{\cdot}025 : 1{\cdot}182 = (2 \,.\, 108) : 63{\cdot}6 = 216 : 63{\cdot}6.$$

Leitet man denselben Strom durch die drei in Figur 188 dargestellten Z setzungsapparate, deren erster conc trierte Salzsäure — HCl — enth während der zweite mit Schwefelsä angesäuertes Wasser — H_2O und der dritte Ammoniak in wäs riger Lösung enthält, so beobach man, dass der in allen drei Ap raten ausgeschiedene Wasserstoff d selbe Volumen ausfüllt und dal in gleichen Zeiten gleich viele Mo cüle ausgeschieden wurden. Zugle wird aber auch ein ebenso gro Volumen Chlorgas ausgeschied daher sind die Wasserstoff- un Chlormolecüle, also auch ihre Ato gleichwertig. Beim zweiten Appar entspricht derselben Wasserstoffmen nur das halbe Volumen Sauerst und daher entfällt erst auf jedes zweite Wasserstoffatom ein äquivalen Sauerstoffatom. Das Wasser enthält also doppelt soviele Wasserstoffato als Sauerstoffatome. Im dritten Apparate endlich nimmt der Stickstoff n den dritten Theil des Wasserstoffes ein, also sind erst drei Wasserstoffato einem Stickstoffatome äquivalent, weil sich die Volumina wie die Zahl d Molecüle und diese wie die Zahl der Atome verhalten.

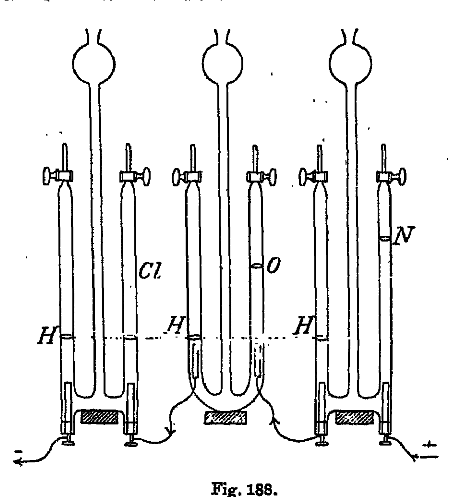


Fig. 188.

Diese Processe sind nicht immer als unmittelbare (primäre) Wirkungen des el trischen Stromes aufzufassen, sondern sie sind theilweise nur die Folgen gleichze auftretender (**secundärer**), rein chemischer Processe. So ist z. B. das reine Was als Nichtleiter gar kein Elektrolyt, aber die im Wasser gelöste Schwefelsäure H_2S zerfällt unter der Einwirkung des Stromes in die Atomgruppen H_2 und SO_4. Der zweiten Apparate ausgeschiedene Wasserstoff ist das Resultat des primären Zersetzun processes. Die Atomgruppe SO_4 wirkt aber zersetzend auf das Wasser, um wie Schwefelsäure zu bilden, wodurch die Wassermolecüle in der nächsten Umgebung d Anode ihrer Wasserstoffatome beraubt werden und daher als secundäres Product d Sauerstoff ausscheiden.

Wenn man eine U-förmig gekrümmte Röhre mit Glaubersalzlösung — $H_2O + Na_2SO$ füllt und dieselbe der Wirkung des elektrischen Stromes aussetzt, so würde sich der Kathode das Natrium ausscheiden, wenn nicht das Wasser, durch dasselbe sof zersetzt, Natriumhydroxyd bilden und dafür den Wasserstoff ausscheiden würde. Mis man daher die Salzlösung mit Lakmustinctur, so wird diese durch das alkali reagierende Natriumhydroxyd blau gefärbt, während sich die Lösung in der Nähe d Anode roth färbt, weil hier die Atomgruppe SO_4 sich mit zwei Wasserstoffatomen z sauerreagierenden Schwefelsäure verbindet und der Sauerstoff ausgeschieden wi

Bei allen diesen Vorgängen besteht die Stromarbeit darin, dass e chemischer Bestandtheil des Elektrolyten, und zwar sind es in der Reg die Metalle, in der Richtung des Stromes fortgerissen und daher dort au geschieden werden, wo der elektrische Strom in einen festen Leiter übertri Auch der Wasserstoff bewegt sich im Elektrolyten wie die Metalle in d Richtung des Stromes.

Man stellt sich diese Erscheinung so vor, dass von der Anode aus se kleine Massentheilchen, **die Ionen**, mit positiven Ladungen im Elektrolyt in Lösung gehen und von der Kathode angezogen werden, während sich d Elektrolyt immer wieder mit Ionen zu sättigen sucht.

Tauchen wir ein Zinkstück in verdünnte Schwefelsäure, so sucht sich die Atomgruppe SO_4 mit dem Zink zu Zinkvitriol zu verbinden, und dabei gehen Zinkionen mit positiven Ladungen in die Lösung über; die ebenso große, negativ elektrische Ladung, die dabei frei wird, gibt dem noch nicht zersetzten Zinkstücke die negative Spannung, die wir der Berührungselektricität zuschreiben. Die Zunahme der Spannungsdifferenz hört auf, sobald die gegenseitige Anziehungskraft der positiv geladenen Zinkionen und des negativ elektrischen Zinkstückes der Lösungskraft das Gleichgewicht halten. Dasselbe gilt für ein in dieselbe Schwefelsäurelösung getauchtes Kupferstück; nur ist in diesem Falle die Spannungsdifferenz viel kleiner, weil auch die Lösungskraft eine geringere ist. Verbinden wir nun die beiden Metalle außerhalb der Flüssigkeit, so gleichen sich die Potentiale der Metallplatten gegenseitig aus, und es können neue Ionen in Lösung gehen. Dabei nehmen sie ganz bestimmte elektrische Ladungen mit und erhalten so den elektrischen Strom in einer entsprechenden Stärke aufrecht. Während sich also die Elektricität im Schließungsbogen nur durch Leitung fortpflanzt, ist sie im Elektrolyten an den Massentransport gebunden, der seinerseits an die Regeln der analytischen Chemie geknüpft ist.

Fließt ein elektrischer Strom durch ein Kupfervoltameter, so löst die an der Anode ausgeschiedene Schwefelsäure immer mehr Kupfer auf, während sich an der Kathode metallisches Kupfer niederschlägt. Die beiden Elektroden verhalten sich also der stromdurchflossenen Flüssigkeit gegenüber ganz anders, als ohne die Wirkung des Stromes. Sobald der Strom aufgehört hat, nehmen beide Kupferplatten dieselbe Spannung an, und daher entsteht kein neuer Strom, wenn wir beide Platten außerhalb der Flüssigkeit durch einen Draht verbinden. Wenn sich aber nach dem Aufhören des Stromes die beiden Metallplatten der Flüssigkeit gegenüber verschieden verhalten, wie es bei den Bleiaccumulatoren der Fall ist, so steht nach dem Aufhören des Ladungsstromes der mit Bleisuperoxyd PbO_2 überzogenen Anode die noch mit Bleisulfat $PbSO_4$ überzogene Kathode gegenüber, auf welcher sich das frisch ausgeschiedene Blei mit der stärker concentrierten Schwefelsäure wieder zu Bleisulfat zu verbinden sucht. Der dadurch frei werdende Wasserstoff wird das Bleisuperoxyd auf der positiven Platte reducieren und sich mit dem Sauerstoff zu Wasser verbinden. Mit dieser Umkehrung der chemischen Processe ist auch eine Umkehrung der Stromrichtung verbunden, wenn die beim Laden als Elektroden dienenden Platten leitend miteinander verknüpft werden. Den so entstehenden Gegenstrom bezeichnet man als Polarisationsstrom.

Der Polarisationsstrom tritt auch schon bei der einfachen Volta'schen Säule auf, da der Strom in der Flüssigkeit vom Zink zum Kupfer fließt und dabei eine Zersetzung des Wassers herbeiführt, ohne dass der ausgeschiedene Wasserstoff eine neue Verbindung eingehen kann. Die dazu nöthige chemische Arbeit macht sich dann als eine der anfänglichen Potentialdifferenz widerstrebende Gegenspannung geltend, welche die Stromstärke sehr bald wesentlich vermindert. Die Entstehung dieses Gegenstromes kann vermieden werden, indem man Elektrolyte verwendet, bei welchen die Zersetzungsproducte sofort Gelegenheit finden, neue Verbindungen einzugehen. Darauf beruht die Einrichtung der sogenannten, constanten Elemente, deren Stromstärke deswegen längere Zeit dieselbe bleibt.

Constante Elemente. Das älteste, constante Element ist das von Daniell. In der jetzt üblichen Form besteht es aus einem Kupfercylinder,

der sich in concentrierter Kupfervitriollösung befindet, und einem Zinkstab in verdünnter Schwefelsäure. Die beiden Flüssigkeiten sind durch ein „Diaphragma“ aus porösem, unglasiertem Thon voneinander getrennt, der aber noch eine den Strom leitende Verbindung ermöglicht. Der von der Schwefelsäure zum Kupfervitriol wandernde Wasserstoff verbindet sich mit der Atomgruppe SO_4 des Kupfervitriols und reconstruiert die vom Strome zersetzte Schwefelsäure. Die aus dem Kupfervitriol verdrängten Kupferionen schließen sich endlich ohne eine weitere chemische Reaction der Kupferplatte an. Am Elektrometer gemessen, zeigt das offene Daniellelement eine Spannung von ungefähr ein Volt.

Das Meidinger-Element (Fig. 189) enthält im tieferen Theile ein Glasgefäß mit concentrierter Kupfervitriollösung und auf derselben schwimmt vermöge ihres geringeren specifischen Gewichtes eine Bittersalzlösung. In letzterer befindet sich ein Zinkcylinder, in ersterer eine Kupferplatte, von der der Strom mittels eines isolierten Drahtes fortgeleitet wird. Der mit Kupfervitriolkrystallen gefüllte Glasballon sorgt dafür, dass die Kupfervitriollösung concentriert bleibt. Dieses Element findet besonders in der Telegraphie Verwendung; es hat eine Spannung von 0·95 Volt. Die elektrolytischen Vorgänge sind ähnlich wie beim Daniellelement.

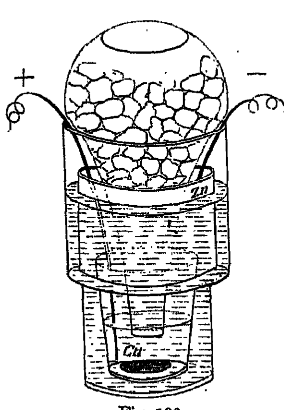


Fig. 189.

Das Leclanchè-Element besteht aus einem Glasgefäße, das mit concentrierter Lösung von Salmiaksalz gefüllt wird, und in diese tauchen der Zinkstab und das Diaphragma, das in pulverisierten Braunstein gebettet, einen Stab aus präparierter Kohle enthält. Bei diesem Elemente liefert der Braunstein den nöthigen Sauerstoff, um den elektrolytisch ausgeschiedenen Wasserstoff unschädlich zu machen. Die Polspannung beträgt 1·4 Volt. Dieses Element wird meistens bei Haustelegraphen verwendet.

Das Bunsen-Element hat als negativen Pol einen in verdünnte Schwefelsäure getauchten Zinkstab, während den positiven Pol ein Kohlenstab bildet, der sich in concentrierter Salpetersäure befindet; beide Flüssigkeiten sind durch eine poröse Thonzelle voneinander getrennt. Die Polspannung beträgt 1·9 Volt. Dem Vorzug, den dieses Element vermöge seiner hohen Spannung besitzt, steht der große Nachtheil gegenüber, dass die sauerstoffreichen Dämpfe der Salpetersäure nicht nur den elektrolytisch ausgeschiedenen Wasserstoff unschädlich machen, sondern auch in der ganzen Umgebung einer solchen Batterie oxydierende Wirkungen ausüben und insbesondere auf die Athmungsorgane schädlich einwirken.

Beim Bunsen-Chrom-Element befinden sich zwei Kohlenplatten zu beiden Seiten einer Zinkplatte und werden in dieselbe Flüssigkeit getaucht; man stellt diese her, indem man 92 g Kaliumbichromat ($K_2Cr_2O_7$) mit 94 cm³ Schwefelsäure in 0·9 l Wasser löst. Diese Lösung ist sehr reich an Sauerstoff und verhindert daher die gasförmige Ausscheidung des Wasserstoffes. Die Polspannung beträgt nahezu 2 Volt. Da bei diesem Elemente nur eine Flüssigkeit in Verwendung kommt, so wird es vielfach zur Herstellung sogenannter „Tauchbatterien“ benützt.

Das wichtigste Element für genaue Spannungsmessungen ist das Normalelement von Latimer Clark. (Fig. 190.) In einem größeren Reagensglase befindet sich an der tiefsten Stelle metallisches Quecksilber, und in dieses taucht ein Platindraht, der in eine Glasröhre eingeschmolzen ist, um den Strom isoliert ableiten zu können. Über dem Quecksilber befindet sich ein Brei von Quecksilberoxydulsulfat $Hg_2 S O_4$ und Zinksulfat $Zn S O_4$ und dann folgt ein von Zinksulfat umgebener Zinkstab als negativer Pol. Bis auf die beiden Stromableitungsdrähte ist das Glas mit einem Kork verschlossen und erhält noch einen Überzug von Marineleim oder Paraffin. Die Spannung beträgt bei einer Temperatur von 15° C 1·434 Volt, und diese ändert sich auch bei etwas höheren Temperaturen sehr wenig.

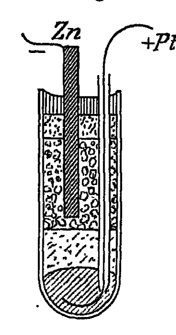


Fig. 190.

Der Accumulator. Die chemischen Veränderungen, welche an zwei Bleiplatten vor sich gehen, wenn wir sie in Schwefelsäure tauchen und als Elektroden in einen Stromkreis einschalten, wurden schon in der Chemie und bei der Behandlung des Polarisationsstromes besprochen. Die Anode oder positive Platte überzieht sich mit einer röthlichbraunen Schichte von Bleisuperoxyd, während sich auf der hellgrauen Kathode oder negativen Platte Bleisulfat bildet. Diese Schichten werden um so dicker, je öfter der Accumulator durch das Hindurchleiten eines Stromes geladen und dann wieder durch Verbindung der Elektroden entladen wird. Die Fähigkeit des Bleies, sehr kräftige Polarisationsströme zu erzeugen, war Sinsteden schon im Jahre 1854 bekannt, aber erst im Jahre 1860 hat Plantè durch Erfindung des Formierungsprocesses diese Eigenschaft der Bleiaccumulatoren so weit zu steigern gewusst, dass der Polarisationsstrom sich wie der Strom eines galvanischen Elementes verwenden lässt, weshalb man dieselben auch als „secundäre Elemente" bezeichnet. Später hat Faure den Formierungsprocess dadurch wesentlich abgekürzt, dass er die Accumulatorplatten aus Bleigittern herstellte und mit Mennige ausfüllte, wodurch die zu formierende Oberfläche viel größer und daher viel schneller wirksam wird. Gute Accumulatoren vermögen nahezu $^3/_4$ der zum Laden verwendeten Elektricitätsmenge als Polarisationsstrom zurückzuerstatten. Der Accumulator kann daher bis zur Entladung gewissermaßen als Aufspeicherungsmittel für den elektrischen Strom dienen. Jede Accumulatorenzelle besitzt, vollständig geladen, ziemlich genau die Spannung von 2 Volt.

Galvanostegie und Galvanoplastik. Beim Galvanisieren oder bei der Galvanostegie handelt es sich meist darum, mit Hilfe des elektrischen Stromes Schmuckgegenstände mit einer Gold- oder Silberschichte zu überziehen oder eiserne Geräthe durch einen Nickelüberzug gegen Rost zu schützen. Beim galvanischen Vergolden und Versilbern benützt man gewöhnlich als Elektrolyt eine Cyankaliumlösung, und in dieses „Gold- oder Silberbad" wird dann der Gegenstand, welcher den Metallüberzug erhalten soll, als Kathode hineingehängt. Die so erzielten Schichten von Gold können so dünn hergestellt werden, dass die Höhe derselben etwa 0·00001 mm ausmacht. Infolgedessen gestattet die galvanische Vergoldung eine viel sparsamere Ausnützung dieses kostbaren Metalles, als es beim Feuervergolden geschieht, das wegen der gleichzeitigen Entwicklung von Quecksilberdämpfen auch sehr gesundheitsschädlich ist. Beim Vernickeln verwendet man als Elektrolyt

eine Lösung Nickelammoniumsulfat. Als Entdecker der Grunderscheinung kann Wach angesehen werden, der zuerst an constanten galvanischen Elementen die Ausscheidung des metallischen Kupfers aus dem Kupfervitriol bemerkte.

Wenn man auf diesem Wege eine Münze mit einer stärkeren Schichte elektrolytisch ausgeschiedenen Kupfers überzieht, so lässt sich diese von der Münze ablösen und zeigt dann einen genauen Abdruck aller auf derselben eingravierten Figuren. Jakobi in Dorpat und Spencer in Liverpool kamen im Jahre 1837 auf den Gedanken, nach diesem Verfahren genaue Copien plastischer Metallarbeiten herzustellen. Um aber nicht erst auf galvanischem Wege einen negativen Abdruck und dann erst mit Hilfe desselben eine mit dem Originale vollkommen übereinstimmende Copie zu erhalten, stellt man den negativen Abdruck gewöhnlich aus Guttapercha her, die in heißem Wasser sehr weich und plastisch wird und daher die feinsten Modellierungen wiederzugeben vermag. Der negative Abdruck wird hierauf mit sehr feinem Graphitpulver überzogen, damit die Oberfläche elektrisch leitend wird, und schließlich als Kathode in eine Kupfervitriollösung gegeben. Dieses Verfahren ist besonders für die Buchdruckerkunst von Bedeutung, da sich dadurch nicht nur wertvolle Kupferstiche und Holzschnitte beliebig vervielfältigen lassen, sondern auch ausgedehnte Letternsätze durch eine einzige Platte ersetzt werden können. Die Elektrolyse findet außerdem noch Verwendung, um die reinen Metalle aus den Erzen und chemischen Verbindungen herzustellen.

Die Stärke des elektrischen Stromes. Nach dem ersten der von Faraday über Elektrolyse aufgestellten Gesetze ist die Masse des zersetzten Elektrolyten der Elektricitätsmenge proportional. Werden in einem Kupfervoltameter in gleichen Zeiten gleiche Kupfermengen ausgeschieden, so müssen auch in gleichen Zeiten durch den Elektrolyten gleiche Elektricitätsmengen hindurchfließen, welche daher einen constanten elektrischen Strom bilden. Die Stärke dieses Stromes bezeichnet man als „ein Ampère“, wenn in jeder Secunde 0·0003284 g Kupfer oder bei Anwendung eines Silbervoltameters 0·001118 g Silber ausgeschieden werden. Verwenden wir denselben Strom zur Wasserzersetzung, so erhalten wir in jeder Secunde 0·00001036 g Wasserstoff, wozu 0·0000933 g Wasser nöthig sind. Die beiden zu Knallgas vereinigten Gase nehmen dann bei 0^0 C und 76 cm Barometerstand ein Volumen von 0·1740 cm^3 ein. M. H. Jakobi nahm diejenige Stromstärke als Stromeinheit an, bei welcher in jeder Minute 1 cm^3 Knallgas entwickelt wird. Da während einer Minute bei 1 Ampère 0·0197 g Kupfer, 0·06708 g Silber, 0·0006215 g Wasserstoff ausgeschieden und daher 0·0056 g Wasser zersetzt oder 10·44 cm^3 Knallgas geliefert werden, so ist 1 Ampère = 10·44 Jakobi.

Um zu finden, wie viel g von irgend einem anderen Elemente durch einen Strom von 1 Ampère ausgeschieden werden, brauchen wir nur die Menge des Wasserstoffes, den er ausscheiden würde, nämlich 0·00001036 g bei einwertigen Elementen mit dem einfachen, bei zweiwertigen mit dem halben Atomgewichte zu multiplicieren. Wollen wir umgekehrt die Stromstärke aus der Menge des in n Minuten ausgeschiedenen Kupfers berechnen, so müssen wir die in g ausgedrückte Kupfermasse durch $n \,.\, 0{\cdot}0197$ dividieren, weil $0{\cdot}0197 = 60 \times (63{\cdot}6 : 2) \times 0{\cdot}00001036$. Derartige Strommessungen setzen aber voraus, dass sich die Stromstärke während der Beobachtungszeit nicht ändert, und sind daher sehr zeitraubend und umständlich. Man verwendet daher zur Strommessung lieber solche Instrumente, die auf den magnetischen Wirkungen des elektrischen Stromes beruhen, und daher eine rasche Ablesung ermöglichen.

Der Widerstand im Stromkreise. Wenn wir die Pole eines constanten galvanischen Elementes oder einer Batterie mit den Quadrantenpaaren eines Thomson'schen Elektrometers verbinden, so zeigt uns dasselbe die Spannung an, die bei offenem Stromkreise herrscht. Diese ändert sich auch nicht, wenn wir an die Pole noch so lange und dünne Drähte aus Kupfer, Eisen oder Messing anschließen und dann erst dieselben zum Elektrometer führen. Wenn wir dagegen die Pole der Batterie einmal unmittelbar mit den Elektroden eines Voltameters verbinden und ein zweites Mal einen sehr langen, dünnen Neusilberdraht einschalten, so scheidet im letzteren Falle ein Kupfervoltameter viel weniger Kupfer aus als vorher, und diese Veränderung schreiben wir dem Widerstande zu, welchen der eingeschaltete Neusilberdraht dem elektrischen Strome entgegensetzt. Die dadurch hervorgerufene Stromverminderung ändert sich keineswegs, wenn wir den Neusilberdraht statt bei der positiven bei der negativen Elektrode oder sogar zwischen die einzelnen Elemente der Batterie einschalten. Wir wollen jetzt ermitteln, wie die aus anderen Materialien hergestellten Leiter beschaffen sein müssen, um in einem Stromkreise denselben elektrischen Widerstand zu erzeugen.

Man könnte, ohne dass sich deshalb die Stromstärke einer Batterie ändert, statt eines Drahtes
aus Silber von 10·3 m Länge einen gleich starken Draht
„ Kupfer „ 10 „ „ , oder einen solchen
„ Messing „ 2·31 „ „ , wenn dasselbe 61·6% *Cu*, 37·5% *St*, 0·8% *Pb* und 0·1% *Fe* enthält,
„ Eisen „ 1·66 „ „
„ Nickel „ 1·25 „ „
„ Neusilber „ 0·543 „ „ (60·7% *Cu*, 25% *St*, 14% *Ni* und 0·3% *Fe*)
oder endlich die in eine Glasröhre von gleichem Querschnitte eingeschlossene Quecksilber-Säule von 0·174 m Länge einschalten; wir schreiben daher allen diesen Leitern den gleichen Widerstand zu.

Wir könnten aber auch statt des Drahtes aus Neusilber von 0·543 m Länge und 1 mm² Querschnitt einen doppelt oder dreimal so langen Draht mit dem doppelten, beziehungsweise dreifachen Querschnitte verwenden, ohne dass dadurch der Widerstand im Stromkreise vermehrt oder vermindert würde. Der Widerstand eines Leiters von durchwegs gleichem Querschnitte ist also der Länge desselben direkt, dem Querschnitt aber verkehrt proportional. Als Einheit des Widerstandes wählte man auf einem Congresse in Paris im Jahre 1884 den elektrischen Widerstand einer Quecksilbersäule von 1 mm² Querschnitt und 106 cm Länge, der als legales Ohm bezeichnet wurde, während der hervorragendste Förderer der Elektrotechnik, Werner Siemens, schon früher den Widerstand einer ebensolchen Quecksilbersäule von 1 m Länge als Einheit aufgestellt hatte. Schließlich wurde der Widerstand bei 106·3 cm Länge als internationales oder wahres Ohm angenommen und mit Ω bezeichnet.

Um den elektrischen Widerstand eines drahtförmigen Leiters für verschiedene Metalle und ihre Legierungen leicht berechnen zu können, wird bei denselben zunächst der Widerstand für 1 cm² Querschnitt und 1 cm Länge genau bestimmt und diesen bezeichnet man als den specifischen Widerstand. So ist z. B. der specifische Widerstand des Kupfers bei 0° C 0·000001533, d. h. der Widerstand eines Kupferstückes von l cm Länge und q cm² Querschnitt beträgt 0·000001533 $(l : q)\ \Omega$, oder wenn wir 0·000001 Ω als 1 Mikro-Ohm ($\mu\Omega$) bezeichnen, gleich 1·533 $(l : q)\ \mu\Omega$.

In Mikro-Ohm ausgedrückt ist der specifische Widerstand für Silber 1·5, Kupfer 1·533, Messing von der oben angeführten Zusammensetzung 6·9, Platin 9·03, schwedisches Eisen 9·166, Blei 19·6, Neusilber 30 und für Quecksilber 94·07. Der Widerstand der Metalle ist aber auch von der Temperatur abhängig und nimmt im Allgemeinen mit steigender Temperatur zu. Es ist aber gelungen Legierungen herzustellen, bei welchen diese Zunahme innerhalb sehr großer Temperaturdifferenzen praktisch nicht von Bedeutung ist. Die wichtigsten derselben sind das 12% Mangan enthaltende Mangankupfer mit dem specifischen Widerstande von 43, das Mangankupfer mit 30% Mangan mit einem solchen von 107, und das aus 40% Nickel und 60% Kupfer bestehende „Constantan" mit dem Werte 50.

Wie man sich beim Wägen der üblichen Gewichtssätze bedient, um durch eine geeignete Auswahl beliebige Gewichte zusammenzustellen, so verwendet man in der Elektrotechnik eigene Widerstandskästen, in welchen sich, auf Spulen gewickelt, Drähte von verschiedener Länge und verschiedenem Querschnitte befinden, die in einen Stromkreis eingeschaltet den Widerstand desselben um so viel vermehren als auf dem Kasten angegeben ist. Werden die Leitungsdrähte an den Klemmen K_1 und K_2 (Fig. 191) befestigt, so erfährt dadurch der Widerstand des Stromkreises noch keine wesentliche Erhöhung, falls alle Metallklötzchen durch die Messingstöpsel miteinander verbunden sind. Nimmt man aber einen Stöpsel heraus, so muss der Strom zuerst den Widerstand passieren, der zwischen den benachbarten Metallklötzchen eingeschaltet ist.

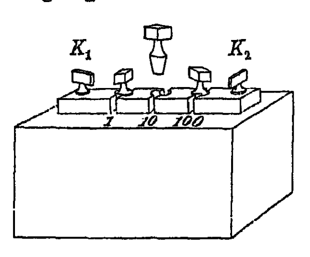


Fig. 191.

Der specifische Widerstand der Nichtmetalle ist im Allgemeinen viel größer, als der der Metalle; bei der relativ gut leitenden Kohle ist er schon 1000 bis 10000 $\mu\Omega$ und bei der Schwefelsäure $6.10^7 \mu\Omega = 60 \Omega$ pro cm Länge und cm² Querschnitt. Bei den sogenannten schlechten Elektricitätsleitern steigt der Wert des specifischen Widerstandes noch viel höher und ist statt in Mikro-Ohm in Megohm $= 10^6$ Ohm ausgedrückt auf 1 cm Länge und 1 cm² Querschnitt bezogen für Glimmer 84.10^6, für vulkanisierten Kautschuk 450.10^6, für Ebonit 28000.10^6, für Paraffin 34000.10^6 und für Flintglas 20000.10^6. Der Widerstand der Luft ist, wenn man nicht abnorm hohe Spannungsdifferenzen anwendet, dass Entladungen in Gestalt von elektrischen Funken auftreten, geradezu unmessbar groß.

Das Ohm'sche Gesetz. Schalten wir in den Stromkreis einer aus mehreren Elementen bestehenden Batterie K (Fig. 192) einen größeren Widerstand W und außerdem noch ein Voltameter V ein, so gestattet uns das letztere nicht nur die Stromstärke, sondern auch die Veränderungen derselben zu messen, wenn wir einen Theil des Widerstandes ausschalten, oder die Zahl der Elemente vermehren oder vermindern. Sobald aus K durch den ausgestreckten Draht W, der aus 4 gleichen Stücken AB, BC, CD und DE besteht, ein Strom hindurchfließt, lässt sich mit Hilfe eines empfindlichen Quadranten-Elektrometers Q zwischen den Punkten A und

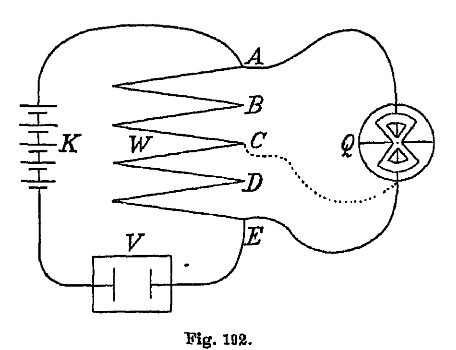


Fig. 192.

eine Spannungsdifferenz nachweisen, die so lange constant bleibt, als die Stromstärke sich nicht ändert. Legen wir dann die zum Elektrometer führenden Drähte an die Punkte A und C, so zeigt es nur mehr den halben Spannungsunterschied und zwischen A und B nur den vierten Theil, während die Stromstärke immer dieselbe bleibt. Die Spannung an den Enden eines Leiters ist also dem Widerstande desselben proportional, solange sich die Stromstärke nicht ändert.

Verbinden wir das Elektrometer Q wieder mit den beiden Punkten A und E und schalten wir in den Stromkreis mehrere neue galvanische Elemente ein, so nimmt die Stromintensität zu und die Menge des pro Secunde ausgeschiedenen Kupfers gibt uns an, wie vielmal der Strom stärker geworden ist. Genau in demselben Verhältnisse nimmt dann auch die zwischen A und E herrschende Spannung zu. Es ist daher die Spannung an den Endpunkten eines linienförmigen Leiters nicht nur seinem Widerstande, sondern auch der Stromstärke proportional. Sie wächst daher nach den Regeln der zusammengesetzten Verhältnisse mit dem Producte des Leitungswiderstandes und der Stromstärke. Die Einheiten des Widerstandes, der Stromstärke und der elektrischen Spannung wurden nun so gewählt, dass an den Enden eines Widerstandes von 1 Ω gerade ein Spannungsunterschied von 1 Volt herrscht, wenn der durch denselben fließende Strom 1 Ampère beträgt. Fließen also durch diesen Widerstand von 1 Ohm i Ampère, so herrscht zwischen seinen Endpunkten eine Spannung von i Volt und die Spannung ist $e = iw$ Volt, wenn durch einen Widerstand von w Ohm ein Strom von i Ampère fließt. Dementsprechend lautet das Ohm'sche Gesetz: die an den Enden eines stromdurchflossenen Leiters herrschende Spannung ist gleich dem Producte aus der Stromstärke und dem Widerstande des Leiters.

Die drei Gleichungen $e = iw$, $i = e : w$ und $w = e : i$ gestatten also, jede dieser drei Größen durch Rechnung zu ermitteln, wenn die beiden andern gegeben sind.

Die erste Abhandlung, welche den Grundgedanken dieses Gesetzes aussprach, veröffentlichte Ohm bereits im Jahre 1826 und behandelte diesen Gegenstand noch gründlicher in einer zweiten Schrift, welche den Titel trägt „Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet" (1827). Aber erst im Jahre 1837, als der französische Physiker Pouillet in einer der Pariser Akademie vorgelegten Schrift auf diese Arbeiten Ohms hinwies, fanden dieselben die gebürende Würdigung. Mit Recht wurde daher eine der drei Größen, die in diesem Grundgesetze der elektrischen Ströme vorkommen, nämlich die Widerstandseinheit, nach ihm benannt. Die Einheit der elektrischen Spannung erhielt zu Ehren des ersten wissenschaftlichen Erforschers der galvanischen Kette, Alessandro Volta, den Namen Volt.

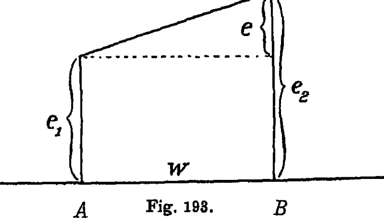


Fig. 193.

Den Zusammenhang zwischen den drei Größen e, i und w können wir graphisch in der Weise darstellen, dass wir die an verschiedenen Punkten eines Leiters herrschenden Spannungen als Ordinaten und den zwischen denselben liegenden Widerstand als Abscisse auftragen. Sind also (Fig. 193) e_1 und e_2 zwei solche Spannungswerte,

ist $e = e_2 - e_1$ ihr Spannungsunterschied und $w = AB$ eine der Maßzahl des Widerstandes entsprechende Strecke, so stellt $e : AB = e : w$, das sogenannte Spannungsgefälle dar, und dieses ist der Stromstärke gleich. Tragen wir daher die in Volt gemessenen Spannungsunterschiede eines Stromkreises in verticaler und die in Ω gemessenen Widerstände in horizontaler Richtung auf, wie es Fig. 194 zeigt, so muss das Gefälle, welches der Stromstärke gleich ist, im ganzen Stromkreise denselben Neigungswinkel haben.

Wenn wir die Pole eines einfachen Volta'schen Elementes durch einen Draht miteinander verbinden, so fließt durch denselben ein Strom, dessen Stärke dem Ohm'schen Gesetze zufolge $i = e : w$, wobei sich aber w auf den Widerstand im gesammten Stromkreise bezieht. Letzterer zerfällt in zwei Theile, in den äußeren Widerstand w_a, der zwischen den Polen des Elementes eingeschaltet wird, und in den innern Widerstand w_i, welchen der Strom in den Platten und in der Flüssigkeit erfährt, es ist daher $i = \frac{e}{w_a + w_i}$. Vertheilen wir (Fig. 194) alle diese Widerstände auf den Umfang eines Kreises, so entfällt auf den Bogen $ABCD$ der innere Widerstand und auf den übrigen Bogen $DGFA$ der äußere Widerstand. Dabei haben wir der Einfachheit wegen angenommen, dass als äußerer Widerstand einfach ein Kupferdraht verwendet wird. AA' stellt die Spannungsdifferenz zwischen der Zinkplatte und dem äußeren Schließungsdrahte dar. In der Zinkplatte fällt das Potential von AA' auf BB', steigt aber bei der Berührung mit der verdünnten Schwefelsäure um $B'B''$, fällt dann wieder längs des Flüssigkeitswiderstandes bis auf CC'', nimmt bei der Berührung mit dem Kupfer noch um den Betrag $C'C''$ ab, sinkt dann bei der Berührung mit dem äußeren Schließungsdrahte bis auf DD' und im Schließungsdrahte selbst endlich bis zum Potentiale des Zinks, das wir hier gleich Null angenommen haben. Die Spannungsdifferenz zwischen A und D' ist also $AM = DD'$ beim geschlossenen und $AN = AA' + B'B'' - C'C''$ am offenen Elemente, mithin ist sie beim offenen um MN größer, weil es im stromlosen Elemente gar kein Stromgefälle gibt. Das stromgebende Element hat also an den Polen eine geringere Spannungsdifferenz als das offene. Machen wir den äußeren Widerstand etwas kleiner, so wird das Gefälle steiler, weil auf einen kleineren Kreisumfang dieselbe Potentialdifferenz wie beim offenen Elemente entfällt; die sogenannte Klemmenspannung DD' wird sich dann von der elektromotorischen Kraft, die der Spannung des offenen Elementes gleich ist, noch stärker unterscheiden.

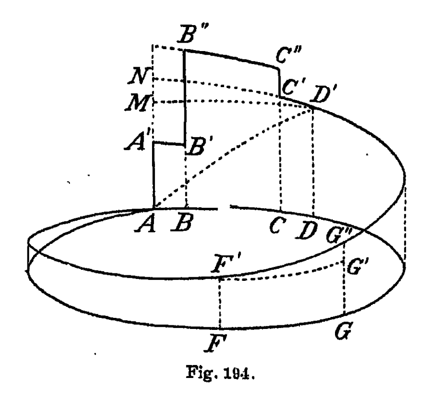


Fig. 194.

Verbinden wir eine Reihe von Elementen so miteinander, dass jeder positive Pol an den negativen Pol des folgenden Elementes angeschlossen wird, so sagt man, die Elemente seien „hintereinander" geschaltet, und dann steigt die Spannung der offenen Kette mit jedem neuen Element um die Spannung desselben; damit nimmt aber auch der innere Widerstand um das $n$fache zu, wenn wir n Elemente auf diese Weise miteinander ver-

knüpfen. Die Stromstärke ist also in diesem Falle $i = \frac{n\,e}{w_a + n\,w_i}$. Wenn wir dagegen alle positiven und alle negativen Pole miteinander verbinden, also n Elemente „nebeneinander“ schalten, so wirken sie wie ein einziges Element mit n mal größeren Platten und einem n fach größeren Querschnitte der Flüssigkeitssäule, und daher erhalten wir einen n mal kleineren inneren Widerstand. In diesem Falle ist also $i = \frac{e}{w_a + w_i : n} = \frac{n\,e}{n\,w_a + w_i}$. Ist der äußere Widerstand im Vergleiche zum inneren sehr groß, so nimmt der Wert für die Stromstärke im ersteren Falle mit der Anzahl der Elemente zu, weil der Zähler entsprechend größer wird, während sich der größere Theil des Nenners w_a nicht ändert. Schalten wir dagegen zwischen die Pole der Kette einen sehr kleinen äußeren Widerstand, so wächst die Stromstärke der nebeneinander geschalteten Elemente mit der Zahl der Elemente, weil die Größe des Nenners mehr vom inneren Widerstande eines einzigen Elementes abhängt und dieser im Vergleiche zum äußeren Widerstande ausschlaggebend ist.

Das Joule'sche Gesetz. Schon im Jahre 1840 berichtete James Prescott Joule der „Royal Society“ über seine Arbeiten, denen zufolge die vom galvanischen Strome erzeugte Wärme dem Widerstande des Leiters und dem Quadrate der Stromstärke proportional sei. Eine weitere Frucht derartiger Untersuchungen war die Abhandlung, welche er im Jahre 1843 der „British Association“ vorlegte, „Über die Wärmewirkungen der Magnetelektricität und über den mechanischen Wert der Wärme“, die zugleich die experimentelle Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalentes enthält. Dass ein Draht durch den elektrischen Strom erwärmt wird, ergibt sich schon daraus, dass man ihn auf diesem Wege sogar zum Glühen bringen kann. Um eine calorimetrische Messung vorzunehmen, bedient man sich eines Apparates von der Form Fig. 195, indem man das erwärmte Wasser zugleich als Thermometerflüssigkeit benützt und beobachtet, wie hoch dasselbe in der angesetzten Röhre R steigt, wenn durch die Spiralen ein Strom fließt. Geht der Strom zuerst nur durch die eine und dann durch beide Spiralen, so steigt die Flüssigkeit in der Röhre das zweite Mal doppelt so rasch. Geht dagegen durch die beiden Spiralen ein doppelt so starker Strom, so nimmt die Flüssigkeit viermal so viel Calorien in sich auf und wird auch dementsprechend mehr erwärmt. Denken wir uns diesen Apparat so eingerichtet, dass der vom Wasser umgebene Widerstand gerade ein Ohm ausmacht, und lassen wir durch denselben einen Strom von 1 Ampère hindurchfließen, so sei q die Zahl der in der Secunde an das Wasser abgegebenen Calorien. Ein Widerstand von w Ohm wird dann $w\,q$ Calorien und bei einer Stromstärke von i Ampère $i^2\,w\,q$ Calorien in der Secunde entwickeln. Da aber dem Ohm'schen Gesetze zufolge $e = i\,w$, so

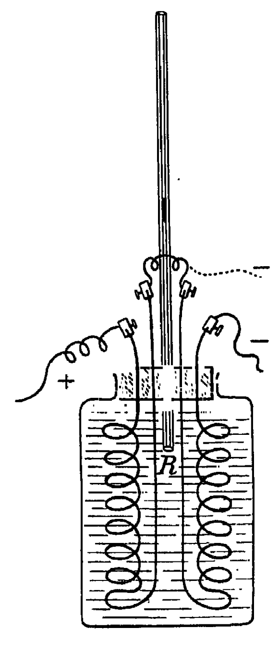


Fig. 195.

kann die Zahl der in einer Secunde in diesem Leiter erzeugten Calorien auch nach der Formel $i^2 w q = e i q$ berechnet werden. Es ist also auch $i^2 w = e i$.

Nach dem Satze vom mechanischen Äquivalente der Wärme entspricht jede Wärmemenge einer bestimmten Arbeit und die Zahl der pro Secunde ausgeschiedenen Calorien muss man daher in Watt ausdrücken. Die aufgestellten Einheiten Volt und Ampère sind aber auch so gewählt worden, dass die q von 1 Ampère pro Ω und Sec. erzeugten Calorien gerade 1 Watt geben, und daher werden in einem Leiter, durch welchen i Ampères fließen und an dessen Enden eine Spannungsdifferenz von e Volt herrscht, $e i$ Watt in Form von Wärme ausgeschieden. Die in jeder Secunde gelieferte Wärme entspricht daher einer mechanischen Leistung von $L = e i = i^2 w$ Watt $= \frac{i^2 w}{4169}$ Calorien pro Secunde, da 1 Calorie pro Secunde $= 425 \cdot 9{\cdot}81$ Watt. Den durch diese Gleichungen ausgedrückten Zusammenhang zwischen der erzeugten Wärme, der an den Endpunkten herrschenden Spannung, der Stromstärke und dem Widerstande, bezeichnet man als das Joule'sche Gesetz.

Fließt z. B. durch einen Leiter, an dessen Enden eine Spannung von 100 Volt herrscht, ein Strom von 30 Ampère, so entwickelt er in jeder Secunde $\frac{100 \cdot 30}{4169} = 0{\cdot}72$ Calorien, und diese Wärmeentwicklung kommt einer Leistung von 3000 Watt gleich. Der Widerstand des Leiters muss dabei $w = e : i = 100 : 30 = 3{\cdot}33$ Ohm betragen, damit bei der angegebenen Spannung ein Strom von 30 Ampère durch den Leiter fließen kann.

Elektromagnetismus.

In einem vom 21. Juli 1820 datierten Circulare theilte der Professor der Universität Kopenhagen, Hans Christian Oersted, mehreren Fachgenossen mit, dass der durch einen Draht fließende elektrische Strom die Magnetnadel aus ihrer Richtung abzulenken vermöge. Durch diese Mittheilung angeregt, untersuchte dann der französische Physiker André-Marie Ampère aus Lyon die Wirkungen des Stromes in der nächsten Umgebung des Leiters und konnte bereits im September desselben Jahres von einer neuen wichtigen Entdeckung berichten, dass sich nämlich zwei parallele Stromleiter gegenseitig anziehen, wenn der Strom in beiden im gleichen Sinne fließt, und dass sie sich gegenseitig abstoßen, wenn die Stromrichtung die entgegengesetzte ist. Den Einwurf, dass es sich dabei nur um elektrostatische Anziehungen und Abstoßungen handle, widerlegte er durch seine scharfsinnig erdachten Versuche und eine im Jahre 1826 erschienene Schrift „Über die elektrodynamischen Erscheinungen und ihre experimentelle Begründung“. Es gelang ihm auch die Wechselwirkung zwischen dem erdmagnetischen Felde und dem elektrischen Strome in der Weise nachzuweisen, dass er durch eine frei bewegliche Drahtspirale einen Strom leitete und zeigte, wie sich ihre Achse in den magnetischen Meridian einstellte und alle Eigenschaften eines Magnetstabes besaß.

Die Wirkung des Stromes auf eine in der Nähe befindliche Magnetnadel formulierte Ampère in folgender Weise: Denken wir uns in den Leiter eine menschliche Figur, die in der Richtung des Stromes schwimmt und das Gesicht der Magnetnadel zuwendet, so wird der Nordpol der Nadel nach links abgelenkt. Genau zum gleichen Resultate wie mit dieser sogenannten Ampère'schen Schwimmregel gelangt man durch Anwendung der Flemming-

schen Regel: Legt man die rechte Hand so auf den Stromleiter, dass die hohle Seite derselben der Magnetnadel zugewendet ist, so wird der Nordpol in der Richtung des Daumens abgelenkt.

Die Anziehung und Abstossung paralleler Ströme lässt sich sehr leicht durch den Apparat Fig. 196 zeigen, der aus zwei flachgedrückten Spiralen aus isoliertem Kupferdraht besteht. Verbindet man die Enden A und D mit den Polen einer Batterie und B mit C, so fließt der Strom durch beide im gleichen Sinne, und die beiden Spiralen ziehen sich an und bleiben dann aneinander haften; wenn man dagegen A und C mit der Batterie verbindet und B mit D, so stoßen sie sich nach Maßgabe der Stromstärke gegenseitig ab. Auch lässt sich mit diesen Spiralen sehr deutlich die Wechselwirkung zwischem dem elektrischen Strome und dem Felde eines Magnetstabes nachweisen, indem die Drahtspirale auf der einen Seite vom Nordpol eines Magneten angezogen und vom Südpol abgestoßen wird, während auf der anderen Seite die entgegengesetzten Wirkungen auftreten. Ein aus sehr vielen Windungen umsponnenen Kupferdrahtes gebildeter Ring, der um einen verticalen Durchmesser sehr leicht drehbar aufgehängt wird, stellt sich senkrecht zur Richtung des magnetischen Meridians, als ob er auf der einen Seite einen Nordpol, auf der anderen einen Südpol hätte. Um diese Versuche mit Hilfe des sogenannten Ampère'schen Gestelles auszuführen, sind ziemlich starke Ströme erforderlich.

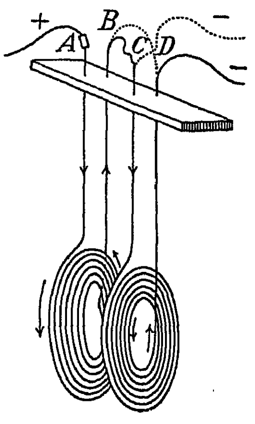


Fig. 196.

Dass jeder Stromleiter von einem magnetischen Felde umgeben ist, kann man auch zeigen, indem man einen sehr starken Strom mittels eines Drahtes in verticaler Richtung durch eine horizontale Fläche leitet und dieselbe mit feinen Eisenfeilspänen bestreut. Die magnetischen Kraftlinien, die dann zum Vorscheine kommen, bilden concentrische Ringe um den Mittelpunkt des Leiterquerschnittes.

Stellt man eine aus vielen Drahtwindungen bestehende Spirale so auf, dass die Hälfte jeder Windung über die mit Eisenfeilspänen bestreute Ebene emporragt, so verlaufen die magnetischen Kraftlinien fast parallel zur Ringachse und schließen sich außerhalb dieses „Solenoides“.

Das magnetische Feld und der elektrische Strom. Nehmen wir nach Laplace an, der Theil AB (Fig. 197) eines Stromes wirke auf einen entfernten Magnetpol m nur mit der Componente, die auf der Verbindungslinie senkrecht steht, und dass diese Wirkung mit einer Kraft erfolge, die der Länge l des Stromleiters, sowie auch der Strom- und Polstärke direct, aber dem Quadrate des Abstandes r verkehrt proportional sei, so ist diese Kraft $f = \frac{m i l}{r^2} \sin \varphi$ (Gesetz von Biot Savart). Daraus lässt sich die Kraft berechnen, mit der ein kreisförmig geschlossener Leiter (Fig. 198) auf einen in seinem Mittelpunkte O befindlichen Nordpol n wirkt. Dabei handelt es sich aber nicht um eine Anziehung oder um eine Abstoßung, sondern

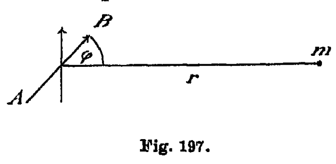
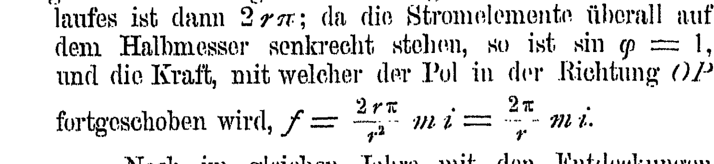


Fig. 197.

um eine Verschiebung in der Richtung OP. Die Länge des wirksamen Stromlaufes ist dann $2 r \pi$; da die Stromelemente überall auf dem Halbmesser senkrecht stehen, so ist $\sin \varphi = 1$, und die Kraft, mit welcher der Pol in der Richtung OP fortgeschoben wird, $f = \frac{2 r \pi}{r^2} m i = \frac{2 \pi}{r} m i$.



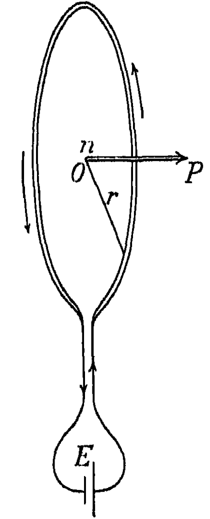


Fig. 198.

Noch im gleichen Jahre mit den Entdeckungen Oersteds und Ampères, stellten die Physiker Biot und Savart, in Übereinstimmung mit diesen Annahmen, fest, dass die Kraft, mit der ein kreisförmiger Stromleiter einen Magnetpol im Sinne der Ampère'schen Regel verschiebt, der Polstärke und Stromintensität direct, dem Abstande aber verkehrt proportional sei. Die Richtung, in welcher der Pol verschoben wird, ändert sich sowohl, wenn wir den Strom statt auf einen Nordpol, auf einen Südpol wirken lassen, wie auch bei einer Umkehrung der Stromrichtung.

Wir erhalten also im Centrum des Kreises und in der nächsten Umgebung desselben ein magnetisches Feld, welches der Magnetnadel die Richtung OP zu geben sucht. Gleichzeitig wird aber an dieser Stelle auch das erdmagnetische Feld wirksam sein und sich mit dem magnetischen Felde des Stromes zu einem resultierenden Felde zusammensetzen, dessen Richtung uns die um den Mittelpunkt drehbare Magnetnadel angibt. Da wir die Ebene des Stromkreises beliebig wählen können, so geben wir dem Stromleiter eine solche Stellung, dass sein magnetisches Feld auf dem des Erdmagnetismus senkrecht steht. In diesem Falle gibt die Tangente des Ablenkungswinkels das Verhältnis der beiden Feldstärken an, und es ist daher $\operatorname{tang} \varphi = (2 \pi i : r) : H$; dabei ist H die Horizontalcomponente des Erdmagnetismus, nach absolutem Maße gemessen, und $2 \pi i : r$ die Intensität des vom Strome i hervorgerufenen Feldes, denn dieser Ausdruck gibt in Dyn ausgedrückt die Kraft an, mit welcher der Einheitspol an dieser Stelle verschoben wird.

Daraus folgt, dass $i = \frac{r H}{2 \pi} \operatorname{tang} \varphi$, dass wir also auch den Strom nach absolutem Maße messen können, wenn wir dies bei H gethan haben, denn π und $\operatorname{tang} \varphi$ sind unbenannte Zahlen, und r hat die Dimension einer Länge, die nach cm gemessen wird.

Es sei z. B. $r = 100$ cm, $H = 0{\cdot}208$, also $\frac{r H}{2 \pi} = 3{\cdot}31$. Gibt ein gewisser Strom den Ablenkungswinkel von $\varphi = 16^0 50'$, so ist $\operatorname{tang} \varphi = 0{\cdot}302$, und daher ist dann $i = 1$. Dieser Strom ist also, nach absolutem Maße gemessen, der Stromeinheit gleich. Aus Gründen der Zweckmäßigkeit und um zugleich auch bezüglich der Einheiten der Spannung und des Widerstandes dem Ohm'schen Gesetze Rechnung zu tragen, hat man den zehnten Theil dieser absoluten Einheit als praktische Einheit gewählt und zu Ehren des genialen Erforschers der elektromagnetischen Grundgesetze als 1 Ampère bezeichnet.

Die Messung des elektrischen Stromes. Die Messung des Stromes auf elektrolytischem Wege verdient schon darum an erster Stelle angeführt zu werden, weil zu derselben nur eine Massen- und eine Zeitbestimmung nöthig ist, während die Messung mit Hilfe der Magnetnadel eine genaue Bestimmung der Horizontalcomponente des Erdmagnetismus voraussetzt. Da es ferner unmöglich ist, die Messung mit einer so kleinen Magnetnadel durchzuführen, dass man annehmen könnte, beide Pole derselben befänden sich genau im Mittelpunkte des Stromkreises, und überdies auch die Dicke des Stromleiters keine genaue Bestimmung des Halbmessers r zulässt, so pflegt man sogar die Wirkung eines kreisförmigen Stromleiters auf die Magnetnadel mit der elektrolytischen Strommessung zu vergleichen und erstere durch ein Kupfer- oder Silbervoltameter zu controlieren.

Dagegen haben gut geaichte Instrumente, bei denen die Ablenkung der Magnetnadel zur Messung verwendet wird, den großen Vorzug, dass die Messung sehr rasch vollzogen werden kann, was insbesonders dann nothwendig ist, wenn die Stromstärke veränderlich ist. Bei Anwendung der elektrolytischen Methode empfiehlt es sich übrigens, durch gleichzeitige Beobachtung des Ablenkungswinkels einer Magnetnadel sich fortwährend davon zu überzeugen, ob sich die Stromstärke nicht ändert, und eventuell durch Widerstandsänderungen in der Weise einzugreifen, dass der Strom

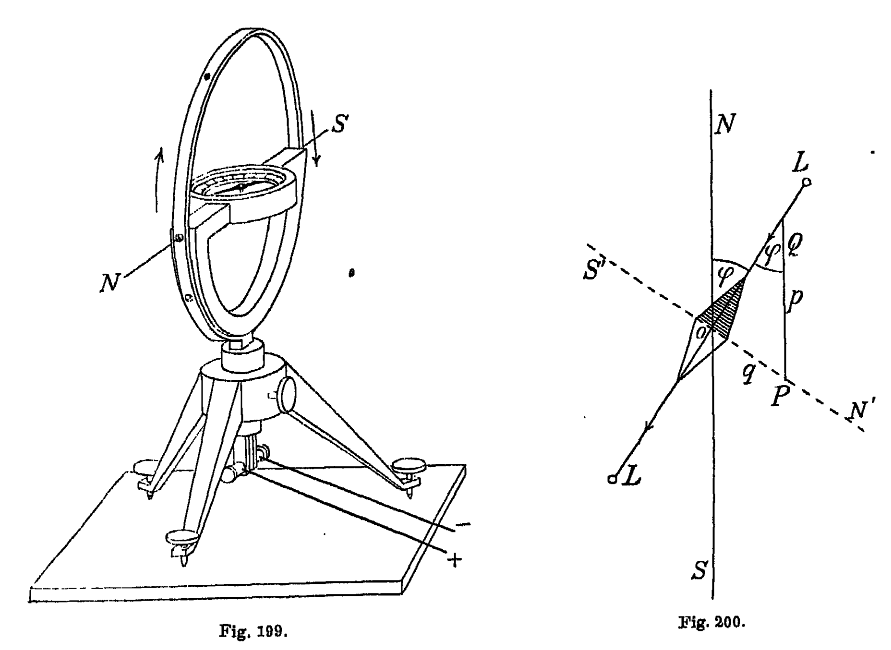


Fig. 199. Fig. 200.

immer denselben Ablenkungswinkel hervorruft, mithin auch dieselbe Stärke beibehält.

Die wichtigsten Strommessungsapparate sind die Tangentenbussole, die Sinusbussole und der in den verschiedenen Galvanometern verwendete Multiplicator.

Die Tangentenbussole (Fig. 199) besteht aus einem kreisförmigen Metallreifen, an dessen unterem Ende der Strom zu- und abgeleitet wird.

Vor der Messung wird die Tangentenbussole so gestellt, dass die Nadel in die Ebene des Stromleiters fällt und daher das magnetische Feld des Stromes die Nadel um einen rechten Winkel zu drehen sucht. Um Fehler zu eliminieren, die in einer nicht genauen Centrierung der Magnetnadel ihren Grund haben, lässt man den Strom nacheinander in entgegengesetzten Richtungen durch die Tangentenbussole fließen und benützt das arithmetische Mittel der Ausschläge zur Berechnung der Stromstärke. Sollen mit Hilfe der Tangentenbussole auch schwächere Ströme gemessen werden, so leitet man den Strom in einem umsponnenen Drahte in mehreren Windungen um den kreisförmigen Reifen herum; dann lautet die Formel für n Windungen $i = \frac{rH}{2\pi n} \operatorname{tang} \varphi$. Dieser Methode der Strombestimmung haftet noch die Ungenauigkeit an, dass die beiden Magnetpole bei der Ablenkung aus der Ebene des Stromleiters heraustreten. Man stellt daher auch die Ebene des Stromleiters, wie früher, in die Richtung des magnetischen Meridians, und dreht dann den Reif, nachdem die Nadel abgelenkt wurde, um eine verticale Achse so, dass die Ablenkung dadurch noch gesteigert wird, bis schließlich die Magnetnadel ganz in die Ebene des Stromleiters hineinfällt. Dann bilden die Vectoren der auf die Nadel wirkenden Kräfte das Dreieck OPQ (Fig. 200), und es ist $q = p \cdot \sin \varphi$, wobei

$$q = \frac{2\pi}{r} im \text{ und } p = Hm \text{ also } i = \frac{rH}{2\pi} \sin \varphi.$$

Da bei dieser Formel statt der Tangente der Sinus vorkommt, so bezeichnet man ein für solche Messungen bestimmtes Instrument als eine Sinusbussole. Sie unterscheidet sich von der Tangentenbussole nur dadurch, dass sie einen horizontalen Theilkreis besitzt, mittelst dessen der Winkel gemessen werden kann, um welchen man den Stromkreis um die verticale Achse gedreht hat.

Sowohl bei der Tangentenbussole, wie auch bei der Sinusbussole muss man die Tangente, beziehungsweise den Sinus des Ablenkungswinkels mit der Maßzahl $\frac{rH}{2\pi}$ multiplicieren, um die Stromstärke zu erhalten. Man bezeichnet diesen Wert als den Reductionsfactor.

Fließt der Strom in n Windungen um die Magnetnadel herum, so heißt der Reductionsfactor $R = \frac{rH}{2\pi n}$. Um sehr schwache Ströme auf diesem Wege messen zu können, lässt man den Strom in nächster Nähe der Nadel in sehr vielen Windungen um dieselbe herumfließen, wie es Figur 201 zeigt, und nennt diese Strommessungsvorrichtung einen Multiplicator. In allen Windungen desselben wirkt der Strom im gleichen Sinne ablenkend auf die Nadel ein, allerdings nicht mehr in der Weise, dass wir den Reductionsfactor nach der obigen Formel berechnen könnten, da der Abstand der einzelnen Windungen von den Magnetpolen sehr verschieden und überdies die Windungen nicht kreisförmig sind. Man ist daher gezwungen, den Reductionsfactor auf empyrischem Wege zu bestimmen, indem man einen

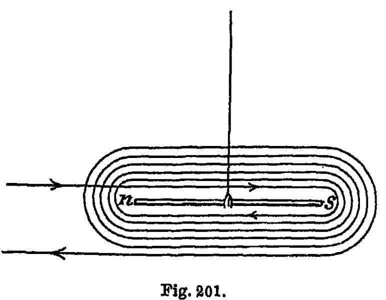


Fig. 201.

Strom von bekannter Stärke durch den Multiplicator leitet und zugleich die Ablenkung beobachtet, welche die Nadel durch denselben erfährt. Auch der Multiplicator muss bei der Messung so aufgestellt werden, dass die Windungen mit der Richtung der noch nicht abgelenkten Magnetnadel parallel verlaufen. Die Stromstärke ist wieder der Tangente des Ablenkungswinkels proportional und kann für sehr kleine Winkel auch diesen selbst proportional gesetzt werden.

Auf der Anwendung des Multiplicators beruhen die verschiedenen galvanometer. Bei diesen wird die Ablenkung dadurch beobachtet, dass der Magnetnadel einen Spiegel fest verbindet, der sich also um denselben Win wie die Nadel. Wie wir später sehen werden und wie man sich auch durch bare Beobachtung leicht überzeugen kann, dreht sich das in einem ebene sichtbare Bild der äußeren Umgebung mit der doppelten Winkelgeschwindig dieselbe Achse, wie der Spiegel selbst. Beobachtet man also in einem nach dem gerichteten Fernrohre die Bewegungen, die das Bild einer vor dem Galvanome gestellten Scala im Spiegel macht, so können wir die im Fernrohre beobachteten schiebungen der Scala als Maßstab für die Strommessung benützen.

Verwenden wir z. B. als Stromquelle einen Accumulator mit der Span von 2 Volt, und schalten wir in den Stromkreis einen Widerstand, welcher den des Galvanometers zu 10000 Ohm ergänzt, sodass der Widerstand des Accumulators dagegen verschwindend klein ist, so wissen wir, dass durch das Galvanometer ein Strom von $2:10000 = 0{\cdot}0002$ Ampères fließt, und wenn dann der im Fernrohre beobachtete Ausschlag 10 Theilstriche der Scala beträgt, so ist also $i = 0{\cdot}0002 = R\,.\,10$, und daher $R = 0{\cdot}00002$.

Erhalten wir hierauf bei einem anderen Strome einen Ausschlag von 23 Theilstrichen, so ist der Strom $i = 0{\cdot}00002\,.\,23 = 0{\cdot}00046$ Ampère. Statt dieser sogenannten „subjektiven" Beobachtungsmethode, kann man auch die „objektive" anwenden, indem man von einer hinreichend starken Lichtquelle einen Lichtstrahl auf den sich drehenden Galvanometerspiegel fallen lässt, der dann bei jeder neuen Stellung nach einer anderen Richtung reflectiert wird, und wenn man dieses bewegliche Lichtbild auf einer Scala auffängt, so kann man in derselben Weise wie früher, zuerst den Reductionsfactor des Galvanometers, und mit Hilfe desselben jeden anderen Strom messen, solange das Lichtbild innerhalb der Scala fällt.

Benützt man die zum Galvanometer führenden Drähte, um einen Condensator zu entladen, so bewirkt auch dieser sehr rasch vorübergehende Entladungsstrom einen stossartigen Ausschlag der Magnetnadel, der dann ein Maß ist für die Stärke der Ladung. Vergleichen wir so die Ausschläge bei den Entladungen mehrerer mit dem gleichen Spannungsunterschiede geladener Condensatoren, so geben uns dieselben das Verhältnis der Capacitäten dieser Condensatoren an. Da bei solchen Messungen die Magnetnadel durch den Stromstoß aus ihrer Ruhelage hinausgeworfen und die Ladungsstärke nach der Wurfweite bemessen wird, so bezeichnet man ein solches Galvanometer als ein ballistisches Galvanometer. Um die äußerste Stellung der Magnetnadel leichter beobachten zu können, verwendet man zu solchen Messungen Galvanometer mit größeren Magnetstäben, die vermöge ihres großen Trägheitsmomentes ihre Bewegungen viel langsamer ausführen.

Die Empfindlichkeit eines Galvanometers kann dadurch noch wesentlich gesteigert werden, dass man dasselbe „astasiert", d. h., dass man das erdmagnetische Feld in der nächsten Umgebung des Galvanometers durch das entgegengesetzte Feld eines Stahlmagneten bedeutend abschwächt oder ein astatisches Nadelpaar benützt.

Die Stromtheilung. Wenn wir die Pole einer galvanischen Kette nicht mit einer einfachen Drahtschlinge, sondern mit einem mehrfach zergliederten Leitungsnetze verbinden, so werden sich in den einzelnen Zweigen desselben verschiedene Stromstärken einstellen. Die für die Berechnung der Stromstärke maßgebende Grundgleichung bleibt auch in diesem Falle das Ohm'sche Gesetz. Herrscht nämlich an den Endpunkten eines unverzweigten Leiterstückes ein Spannungsunterschied e, so besteht für dasselbe die Gleichung $e = iw$, wenn w den Widerstand dieses Leiterstückes und i die in demselben vorhandene Stromstärke bedeutet. Für die Stromverzweigungsstellen

und für Stromkreise mit zwei oder mehreren Verzweigungsstellen hat Gustav Robert **Kirchhoff** zwei aus den Jahren 1846—49 stammende Sätze aufgestellt, mit deren Hilfe sich die Stromstärke in den einzelnen Zweigen leicht feststellen lässt; sie heißen:

1) Die Summe der Ströme, die nach einem Verzweigungspunkte hinfließen, ist gleich der Summe der Ströme, die von demselben wegfließen. Für die Stromverzweigungsstellen A und B in Fig. 202 ist $i = i_1 + i_2$.

2) In jedem geschlossenen Stromkreise ist die Summe der Producte aus der Stromstärke und dem Widerstande gleich der in diesem Stromkreise eingeschalteten elektromotorischen Kraft, wobei gleichgerichtete Ströme mit dem gleichen, entgegengesetzt gerichtete Ströme aber mit verschiedenen Vorzeichen versehen werden.

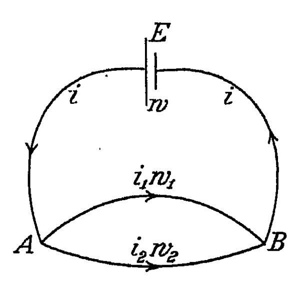


Fig. 202.

Im Stromkreise $A w_1 B E A$ ist also $i w + i_1 w_1 = e$, wenn e die elektromotorische Kraft des galvanischen Elementes E bedeutet. Ebenso ist $i w + i_2 w_2 = e$, und durch Subtraction dieser beiden Gleichungen ergibt sich die für den dritten Stromkreis $A w_1 B w_2 A$ geltende Gleichung: $i_1 w_1 - i_2 w_2 = O$, da in diesem Stromkreise keine elektromotorische Kraft vorkommt. Aus der letzteren Gleichung folgt außerdem noch die Proportion $i_1 : i_2 = w_2 : w_1$; bei jeder Verzweigung eines Stromes in zwei Theilströme verhalten sich dieselben verkehrt wie die Widerstände dieser Leiterstücke.

Bezeichnen wir den reciproken Wert des Widerstandes als **Leitungsfähigkeit**, sodass ein Leiter mit dem Widerstande von 1 Ω zugleich die Einheit der Leitungsfähigkeit besitzt, so können wir auch sagen, die Stromstärken sind der Leitungsfähigkeit des Leiters proportional. Ist also $1 : w = l$, so folgt demnach $i_1 : i_2 = l_1 : l_2$.

Wird an einer Stelle der Strom in mehr als zwei Theile getheilt, die sich wieder an derselben Stelle vereinigen, so muss dem ersten Kirchhoff'schen Gesetze zufolge die Summe aller Theilströme die Stärke des ungetheilten Stromes ergeben und außerdem müssen sich die einzelnen Theilströme wie die Leitungsfähigkeit ihrer Leiter verhalten.

Die Leitungsfähigkeit einer Doppelleitung, wie sie in Fig. 202 zwischen A und B besteht, ist gleich der Summe der Leitungsfähigkeit der einzelnen Theile $l = l_1 + l_2$. Ist nämlich w' der Widerstand der Doppelleitung, so muss $i w' = i_1 w_1 = i_2 w_2$, und $l = 1 : w'$ sein.

$$\text{Wegen } i = i_1 + i_2 = i \frac{w'}{w_1} + i \frac{w'}{w_2} = i w' \left(\frac{1}{w_1} + \frac{1}{w_2} \right) = i w' (l_1 + l_2)$$

$$\text{ist also } \frac{1}{w'} = l = l_1 + l_2.$$

Messung der elektromotorischen Kraft. Da die galvanischen Elemente aus Leitern bestehen, die einen gewissen Widerstand besitzen, so ist die zwischen ihren Polen herrschende Spannung nicht mehr gleich ihrer elektromotorischen Kraft, sobald das Element Strom gibt. Die elektromotorische Kraft des Elementes ergibt sich also strenggenommen nur bei der Spannungsmessung mit Hilfe des Elektrometers. Man gelangt aber auch mit Hilfe des Galvanometers zu praktisch guten Resultaten. Schalten wir die beiden Elemente E_1 und E_2 so hintereinander, dass sich ihre elektromotorischen Kräfte addieren, so erhalten wir einen Strom $i_1 = \frac{e_1 + e_2}{w}$ der im Galvano-

meter den Ausschlag α_1 hervorruft. Schalten wir hierauf die beiden Elemente wieder hintereinander, aber so, dass sie den Strom nach entgegengesetzten Richtungen schicken würden, dann ist der erzeugte Strom $i_2 = \frac{e_1 - e_2}{w}$ und daher der zweite Ausschlag α_2 ein viel schwächerer. Bedeutet also R den Reductionsfactor des Galvanometers, so ist $e_1 + e_2 = \alpha_1 R w$ und $e_1 - e_2 = \alpha_2 R . w$, also $e_1 = \frac{Rw}{2}(\alpha_1 + \alpha_2)$ und $e_2 = \frac{Rw}{2}(\alpha_1 - \alpha_2)$. Ist uns die Spannung des einen Elementes e_2 anderswoher bekannt, so ergibt sich aus der Proportion $e_1 : e_2 = (\alpha_1 + \alpha_2) : (\alpha_1 - \alpha_2)$, dass $e_1 = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} e_2$

Nach der Compensationsmethode verfährt man folgendermaßen: In Fig. 203 stellt AB einen geradlinig ausgestreckten Draht von durchwegs gleichem Querschnitte dar, weshalb die Länge desselben seinem Widerstande proportional ist. Zuerst verbindet man die beiden zu vergleichenden Elemente so mit Punkt A, dass beide den Strom in derselben Richtung durch den Leiter AB schicken, wenn ihr zweiter Pol mit einem anderen Punkte des Leiters verbunden wird. Dann verbindet man den zweiten Pol des Elementes E_1 mit B, E_2 mit einem Galvanometer G und sucht mit dem an das Galvanometer angeschlossenen Drahte diejenige Stelle C des Leiters AB, für welche durch das Galvanometer kein Strom fließt. Ist nämlich das Stromgefälle im Leiter AB so stark, dass auf die Strecke AC eine Spannungsdifferenz entfällt, die der elektromotorischen Kraft des Elementes E_2 gleich ist, so ist $AE_2\,GCA$ nach dem zweiten Kirchhoff'schen Satze im Stromkreise $e_2 = i w_2$, wenn w_2 und i Widerstand und Stromstärke in der Drahtstrecke AC bedeuten, da der Strom im Leiter $AE_2\,GC$ gleich Null ist.

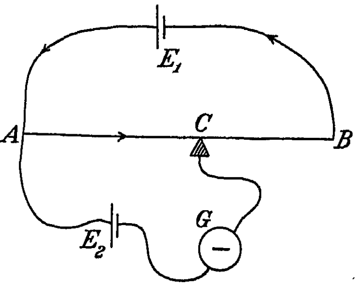


Fig. 203.

Wäre der Spannungsunterschied zwischen A und C größer als e_2, so würde ein Strom in der Richtung vom Elemente zum Galvanometer fließen, sonst aber in der entgegengesetzten Richtung. Ist für ein drittes Element E_3 die Spannung $e_3 = i w_3$ und $w_3 = AC'$, so verhalten sich die elektromotorischen Kräfte wie die Widerstände $e_2 : e_3 = w_2 : w_3$, und diese wie die Längen AC und AC'. Die elektromotorische Kraft von E_3 ist also $e_3 = \frac{AC'}{AC} e_2$. Verwenden wir bei E_2 ein Clarkelement, das eine Spannung von 1·434 Volt besitzt, so ergibt sich daraus auch die von E_3 nach der Formel $e_3 = \frac{AC'}{AC}$ 1·434 Volt.

Bei dieser Messung haben wir das Galvanometer nur dazu benöthiget, um zu sehen, ob durch dasselbe überhaupt ein Strom hindurchgeht, beziehungsweise, ob die Intensität desselben gleich Null ist. Man bezeichnet daher diese Messmethode als eine Nullmethode.

Widerstandsmessungen. Schaltet man den zu messenden Widerstand mit einem Galvanometer in den Stromkreis einer galvanischen Kette, so zeigt das Galvanometer durch seinen Ausschlag einen ganz bestimmten Strom an. Wenn wir dann den unbekannten Widerstand durch einen Widerstandskasten oder durch einen „Rheostaten" ersetzen, dessen Widerstände wir

kennen, so brauchen wir nur den Widerstand des letzteren so lange abzuändern, bis das Galvanometer die frühere Stromstärke angibt. Da der Strom nur dann dieselbe Intensität annehmen kann, wenn wir den unbekannten Widerstand durch einen gleich großen ersetzt haben, so bezeichnet man diese Messungsart treffend als die Substitutionsmethode.

Sehr häufig verwendet man bei Widerstandsmessungen die Wheatstone'sche Brücke (Fig. 204). E stellt ein galvanisches Element dar, von dem der Strom nach D fließt, wo er sich theilt und hierauf einerseits den zu messenden Widerstand x und andererseits noch einen Vergleichswiderstand R passiert, um zu den Punkten A und B zu gelangen. Sind diese beiden Punkte mit dem Galvanometer G nicht verbunden, so vereinigen sich die beiden Theilströme wieder in C und kehren über diesen „Schleifcontact" zum Elemente E zurück. An den Endpunkten dieser beiden Stromzweige herrscht offenbar die Potentialdifferenz von D und C. Verbinden wir also die Punkte A und B mit dem Galvanometer G und es fließt dann kein Strom durch dasselbe, so wissen wir, dass auch an diesen Punkten dasselbe Potential herrscht, und dass nach dem zweiten Kirchhoff'schen Gesetz

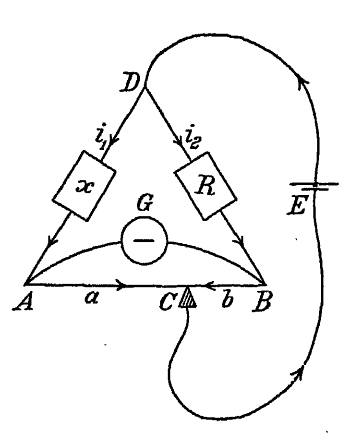


Fig. 204.

$$i_1 . x = i_2 . R \text{ und } i_1 . a = i_2 . b, \text{ dass mithin } i_2 : i_1 = x : R = a : b.$$

Stellt also AB einen ausgespannten Draht dar, so brauchen wir nur durch Verschiebung des Schleifcontactes C diejenige Stelle aufzusuchen, für welche das Galvanometer stromlos wird; dann ist $x = R . a : b$.

Da die Widerstände a und b den Strecken AC und BC proportional sind, so braucht man also den Vergleichswiderstand R nur mit dem Verhältnis dieser beiden Strecken zu multiplicieren, um den gesuchten Widerstand x zu finden. Bei den für diese Methode bestimmten Instrumenten findet man gewöhnlich schon an jeder Stelle zwischen A und B diese Verhältniszahl angegeben.

Thermoelektricität.

Durch die Entdeckung Oersteds und ihrer Anwendung beim Galvanometer war man in den Besitz eines sehr empfindlichen Messinstrumentes für schwache Ströme und damit auch für schwache elektrische Spannungen gelangt. Infolgedessen fand Thomas J. Seebeck schon nach einem Jahre eine neue sehr wichtige Elektricitätsquelle, die mit der Berührungselektricität im engsten Zusammenhange steht, nämlich die Thermoelektricität.

Wenn wir ein Stück Wismutmetall AC mit einem Eisenstück CA in Berührung bringen (Fig. 205), so wird der elektrischen Spannungsreihe zufolge das Wismutstück positiv elektrisch, wenn das Eisen das Potential Null besitzt. Es kann aber in dem kreisförmig geschlossenen Leiter kein Strom zustande kommen, weil an der Contactstelle A der Potentialunterschied AA' gleich groß ist wie bei C, nämlich CC'. Diese Spannungsunterschiede sind aber bei verschiedenen Temperaturen verschieden. So wird z. B. die

Spannungsdifferenz AA' zwischen Wismut und Eisen bei zunehmender Temperatur kleiner, nämlich EE'. Wenn wir daher die Contactstelle C erwärmen, so heben sich die Spannungsunterschiede bei A und C nicht mehr auf, und es stellt sich ein Strom in der Richtung der niedersteigenden Linie ein. Die

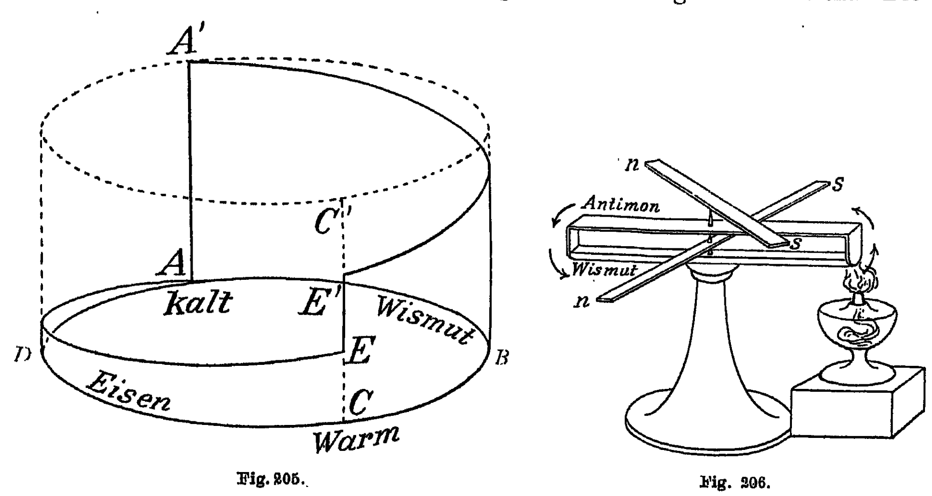
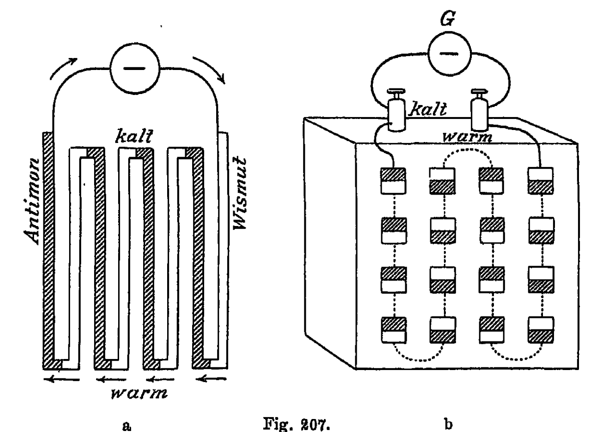


Fig. 205. Fig. 206.

Stromstärke richtet sich nach dem Ohm'schen Gesetze. Verbinden wir zwei Metalle, zwischen welchen diese Wirkung relativ stark auftritt, z. B. Wismut und Antimon, wie es in Figur 206 dargestellt wird, so geben uns die beiden Magnetnadeln die Stromrichtung an, derzufolge an der erwärmten Stelle der Strom vom Wismut zum Antimon und an der kalten Verbindungsstelle vom Antimon zum Wismut fließt. Um zwischen den verschiedenen Metallen eine sehr innige Berührung herzustellen, werden die beiden Metalle an der Berührungsstelle zusammengelöthet. Für die zuletzt genannten Metalle stellt sich bei einer Temperaturdifferenz von 1° C eine elektromotorische Kraft von 0·00009 Volt ein. Um trotzdem bedeutendere Wirkungen zu erzielen, vereinigte N o b i l i in Florenz (1831) eine größere Reihe solcher „Thermo-Elemente“ in der Weise zu einer „thermoelektrischen Säule“, dass die gleichartigen Löthestellen alle nach derselben Seite gerichtet sind und daher gleichzeitig erwärmt werden können (Fig. 207 a, b). Die von solchen Thermosäulen erzeugten Ströme sind infolge des geringen inneren Widerstandes der Elemente dennoch relativ stark und gestatten daher, mit einem aus sehr vielen Windungen bestehenden Multiplicator verbunden, außerordentlich kleine Temperaturdifferenzen zu messen. Die Thermoströme hat



a Fig. 207. b

zuerst Melloni im Jahre 1841 zu Temperaturbestimmungen benützt. Hiezu eignen sich die Thermo-Elemente darum besonders gut, weil die Metalle sehr geringer Wärmemengen bedürfen, um sofort die zu bestimmende Temperatur anzunehmen; sie zeigen daher alle Temperaturschwankungen viel rascher an als jedes andere Thermometer.

Mit dem Zustandekommen der Thermoströme steht aber noch eine andere Erscheinung im Zusammenhange, welche zuerst Peltier im Jahre 1834 bemerkte und die daher nach ihm Peltiereffect genannt wird. Leitet man nämlich durch ein Thermo-Element, das in allen seinen Theilen dieselbe Temperatur aufweist, einen elektrischen Strom, so wird es überall durch die nach dem Joule'schen Gesetze auftretende Wärme eine höhere Temperatur annehmen. Außerdem zeigt sich aber, dass diejenigen Löthstellen, welche erwärmt einen Strom von der gleichen Richtung geben würden, nicht jene Temperatur erreichen, die sie vermöge der Joule'schen Wärme annehmen sollten, dass sie also durch den Strom im Vergleich zur Umgebung abgekühlt werden. An jenen Löthstellen dagegen, die erwärmt einen Strom von der entgegengesetzten Richtung hervorrufen, tritt eine noch stärkere Temperatursteigerung auf. Es stellt sich also immer diejenige Wirkung ein, welche dem durchfließenden Strome entgegenarbeitet. In ähnlicher Weise ruft ja auch ... eines Volta'schen Elementes in demselben die Polarisation hervor, ... Entwicklung hindernd entgegentritt. Genau dieselbe Erfahrung ... allen Inductionserscheinungen zu Grunde, die wir im folgenden ...e kennen lernen werden.

Die Induction.

..enn wir ein Stück weiches Eisen in das Feld eines starken per...anenten Magneten einführen, so wird es magnetisch, behält aber den ...agnetismus nur so lange unverändert bei, als die Feldstärke sich nicht ändert. Auch ein isolierter Leiter wird im elektrischen Felde durch Vertheilung elektrisch und die Ladungen verschieben oder verändern sich nur, wenn das Feld sich ändert. Ähnliche Erscheinungen zeigen sich auch bei folgendem Versuche (Fig. 208):

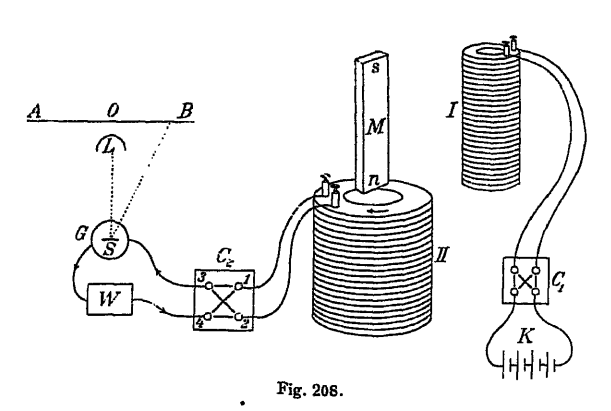


Fig. 208.

Die Spule II ist mit einem sehr langen umsponnenen Kupferdrahte bewickelt, dessen Enden zu zwei Klemmen führen. Diese sind durch zwei Drähte mit dem Commutator C_2 verbunden. Unter einem Commutator versteht man eine Vorrichtung, die dazu dient, in einem Stücke eines geschlossenen Stromkreises die Richtung des Stromes zu ändern. In einem Holzstücke befinden sich z. B. vier mit Quecksilber gefüllte Vertiefungen 1, 2, 3 und 4. Verbinden wir 1 mit 3 und 2 mit 4,

so lege ein aus der Spule kommender Strom den durch Pfeile angedeuteten Weg zurück. Verbinden wir dagegen 1 mit 4 und 2 mit 3, so fließt der aus der Spule in derselben Richtung kommende Strom durch G und W in entgegengesetzter Richtung. Den Widerstandskasten W schalten wir ein, um Ströme, welche zu starke Ausschläge der Magnetnadel hervorrufen würden, durch Erhöhung des Widerstandes im Stromkreise zu vermindern. AB ist eine in gleiche Theile getheilte Scala, nach welcher der Spiegel S des Galvanometers G den von L ausgehenden Lichtstrahl reflectiert. Geht durch die Windungen des Multiplicators ein Strom, so wird die Magnetnadel abgelenkt, und das ursprünglich auf den Mittelpunkt O der Scala eingestellte Lichtbild wird sich z. B. gegen B bewegen. Fließt dann nach Umstellung des Commutators der Strom in der entgegengesetzten Richtung durch das Galvanometer, so bewegt sich das Lichtbild nach der anderen Seite.

Wir versenken zuerst in den Hohlraum der Spule einen Magnet ns, und zwar mit dem Nordpol nach unten. Während derselbe in der Spule verschwindet, bemerken wir, wie sich das Lichtbild auf der Scala z. B. nach rechts bewegt und dann nach einigen Schwingungen in seine Ruhelage zurückkehrt, um dort zu verbleiben. Das magnetische Feld, in dem sich jetzt die Spule befindet, vermag offenbar keinen dauernden Strom hervorzurufen, und die Spule bleibt jetzt, wie außerhalb des magnetischen Feldes, vollkommen stromlos. Sobald wir aber den Magnet wieder herausziehen, erhalten wir abermals einen vorübergehenden Ausschlag, jedoch nach links. Der in der Spule entstandene Strom muss also das zweitemal die entgegengesetzte Richtung haben. Die Spule verhält sich demnach im magnetischen Felde genau so wie außerhalb desselben; nur das Eintreten und das Verschwinden des Feldes ruft in ihr Ströme hervor, und zwar Ströme von entgegengesetzter Richtung.

Stecken wir dann bei einem zweiten Versuche den Magnet zuerst mit dem Südpole in die Spule, so erhalten wir, wenn sonst die ganze Versuchsanordnung dieselbe geblieben ist, zuerst einen Ausschlag nach links, und beim Herausziehen den Ausschlag nach rechts. Die Richtung des entstandenen Stromes ändert sich also auch, wenn wir die Pole des „inducierenden Magneten" miteinander vertauschen.

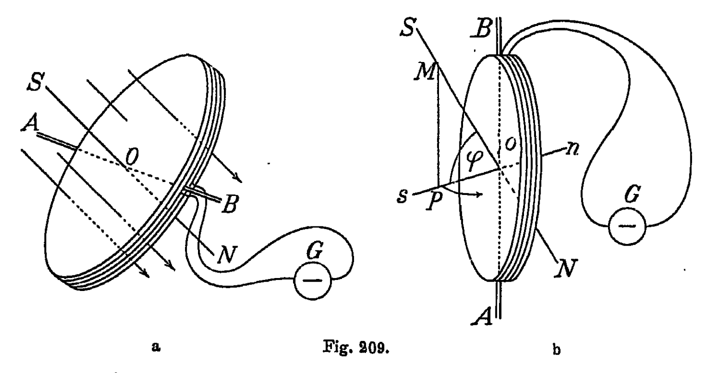
Diese nur durch die Veränderung des Feldes bedingte vorübergehende Stromerregung ist das wesentliche Merkmal der sogenannten „Induction", die Faraday im Jahre 1831 entdeckt und deren weittragende Bedeutung er zuerst erfasst hat. Da beim eben beschriebenen Versuche der Strom durch die Bewegung eines Magneten hervorgerufen wurde, so bezeichnet man diese Induction als Magnetinduction.

Verbinden wir eine zweite kleinere Spule I durch einen Commutator C_1 mit einer galvanischen Kette K, so wird der durch diese Spule I fließende Strom ebenfalls ein magnetisches Feld in der Umgebung derselben hervorrufen und wenn wir mit derselben den früher angeführten Versuch wiederholen, so tritt wieder eine Inductionswirkung auf, die sich von der früheren, je nach der Stromstärke in der Spule I, nur durch die Größe des Ausschlages unterscheidet. Wir können aber diesen Versuch in der Weise abändern, dass wir die Spule I noch stromlos in die Spule II versenken und erst dann den Strom einleiten; die Wirkung ist in diesem Falle dieselbe, als ob wir die bereits stromdurchflossene Spule I mit der Hand in die Spule II hineingeschoben hätten. Die Unterbrechung des Stromes in der Spule I bringt ebenfalls dieselbe Wirkung hervor, wie das Herausziehen. Eine plötzliche Verstärkung

des Stromes wirkt wie das Einschieben einer neuen Spule, und wenn wir endlich durch rasches Umstellen des Commutators C_1 die Stromrichtung in I verändern, so erhalten wir einen Ausschlag, wie wenn wir die Spule herausgezogen und dann rasch wieder mit vertauschten Polen hineingeschoben hätten, wir erhalten also eine Wirkung im selben Sinne, aber mit doppelter Kraft. Diese nicht mehr von einem Magnete, sondern von einem Strome ausgehende Induction bezeichnet man im Gegensatze zur früheren als Elektro- oder Voltainduction.

Eine noch viel stärkere Wirkung als in den beiden vorangehenden Fällen können wir erzielen, indem wir die stromlose Spule I in die Spule II versenken und dann den Hohlraum der Spule I mit ausgeglühten Stäben aus weichem Schmiedeeisen ganz oder theilweise füllen. Wenn wir jetzt den Strom in die Spule I leiten, so nehmen schon bei einer geringen Anzahl von Eisenstäben die Ausschläge der Magnetnadel beim Schließen und Öffnen des sogenannten „primären" Stromes in der Spule I derart zu, dass das Lichtbild nach beiden Seiten hin über die Scala hinausgeht, und wenn wir dieselben durch Einschalten eines Widerstandes W entsprechend vermindern, so können wir beobachten, wie die Inductionswirkung immer stärker wird, je mehr weiches Eisen wir in das magnetische Feld einführen. Wir bezeichnen diese durch die Einführung von weichem Eisen gesteigerte Wirkung als die elektromagnetische Induction.

In allen diesen Fällen hängt die Stromstärke in der „secundären" Spule II nur von der Intensität des magnetischen Feldes und nicht von der Art seiner Entstehung ab, geradeso wie ein Thermometer deshalb keine andere



a Fig. 209. b

Temperatur anzeigt, ob es in Quecksilber oder in Wasser getaucht oder in der freien Luft bis zum gleichen Grade erwärmt wird.

Bei sämmtlichen Versuchen stand ferner die Richtung des magnetischen Feldes innerhalb der Spule auf der Ebene der Drahtwindungen senkrecht. Fließt durch die Windungen (Fig. 209 a) ein Strom, so entsteht ein Feld mit der Richtung NS; ändert sich die Stärke oder die Richtung des Feldes, so wird in den Windungen ein Strom induciert. Bildet die Normale sn im Mittelpunkte der Windungsfläche mit der Vectorrichtung SN des magnetischen Feldes den Winkel φ (Fig. 209 b), so kommt für die Inductionswirkung nur die Projection des Vectors auf die Normale der Windungen in Betracht. Wir können daher die Windungen der Wirkung des magnetischen Feldes auch dadurch entziehen, dass wir die Windungsebene drehen, bis diese Pro-

jection gleich Null ist und der Vector des Feldes in die Ebene der Windungen fällt.

Die durch Drehung zustandekommenden Inductionswirkungen zeigen sich bereits im erdmagnetischen Felde. Wir bewickeln die Peripherie einer kreisförmigen Holzscheibe mit sehr vielen Windungen umsponnenen Kupferdrahtes und führen die Enden desselben zu einem ballistischen Galvanometer G (Fig. 209 a). Stellen wir die Scheibe so, dass die Richtung einer Inclinationsnadel auf ihr senkrecht steht, und drehen wir dann die Scheibe um den Durchmesser AB als Achse um einen gestreckten Winkel, so sei der Ausschlagswinkel α_1. Stellen wir hierauf die Scheibe vertical (Fig. 209 b) un[illegible] dass eine Declinationsnadel auf ihr senkrecht steht, so sei bei de[illegible] um einen gestreckten Winkel der Ausschlag α_2. Diese beiden A[illegible] verhalten sich, wie die volle Feldstärke des Erdmagnetismus zur H[illegible] componente, also wie die Seiten, welche den Winkel φ einschlie[illegible] diesem Wege können wir die Totalintensität des Erdmagnetismus mit de[illegible] Horizontalcomponente vergleichen, die wir früher ermittelt haben. Die hier benützte Vorrichtung bezeichnet man daher als Erdinductor.

In ähnlicher Weise können wir die Intensitäten zweier Felder dadurch miteinander vergleichen, dass wir die Ausschläge beobachten, die wir in einem ballistischen Galvanometer erhalten, wenn beide Felder nacheinander auf dieselbe Spule inducierend wirken. Lassen wir, wie bei der Versuchsanordnung Fig. 208, den Strom einer galvanischen Kette durch die Windungen der Spule I fließen, so entsteht in der Spule II ein um so stärkerer Inductionsstrom, je stärker das von der Spule I inducierte magnetische Feld ist. Den entsprechenden Ausschlag im Galvanometer erhalten wir durch Umstellung des Commutators C_1. Ist die Spule I nur mit Luft gefüllt, so wollen wir die Feldstärke mit H bezeichnen, und dann die weitere Zunahme der Feldstärke beobachten, wenn wir verschiedene Eisensorten in das magnetische Feld einführen.

Dabei zeigt sich, dass weiches Eisen die Feldstärke viel mehr kräftiget, als Gusseisen oder Stahl. Wir bezeichnen das durch weiches Schmiedeeisen, beziehungsweise durch Gusseisen verstärkte Feld mit B, und die Zahl, welche angibt, wie vielmal das mit Luft gefüllte Feld durch die Einführung der betreffenden Eisensorte stärker geworden ist, mit μ.

Die in der folgenden Tabelle angegebenen Werte sind natürlich nur Mittelwerte, da es sehr viele Sorten von Schmiede- und Gusseisen gibt, die sich der Magnetisierung gegenüber verschieden verhalten. Hieraus ergibt sich, dass das Schmiedeeisen viel „permeabler" ist als das Gusseisen, da es bei derselben Induction die magnetischen Kraftlinien in größerer Zahl in sich vereinigt. Das Eisen ist nämlich im allgemeinen um so permeabler, je weniger Kohlenstoff es enthält.

Schmiedeeisen		μ	Gusseisen		μ
H	B		H	B	
1·66	5000	3000			
5	10000	2000	5	4000	800
12	13000	1080	10	5000	500
52	16000	308	80	8000	100
200	18000	90	188	10000	53

Der Elektromagnet. Wie sich aus den verschiedenen Inductionsversuchen ergibt, erzielt man weitaus die stärksten magnetischen Felder, indem man das vom elektrischen Strome erzeugte magnetische Feld mit weichem Eisen ausfüllt. Das so magnetisierte Eisenstück bezeichnet man als einen Elektromagneten.

Die Stärke desselben wird durch die Zahl der Kraftlinien pro cm^2 bemessen. Wenn z. B. die Horizontalcomponente des Erdmagnetismus $H = 0{\cdot}208$, so entfallen auf jeden cm^2 0·208 und daher auf einen m^2 2080 Kraftlinien. Durch Einführung von Schmiedeeisen steigt dann diese Zahl bei einer Feldstärke von 5 Kraftlinien für jeden cm^2 um das $\mu = 2000$ fache, also auf 10000 pro cm^2.

Wir haben früher einem Magnete die Einheit der Intensität zugeschrieben, wenn jeder seiner Pole einen zweiten Pol von der gleichen Stärke in der Entfernung 1 cm mit der Kraft von 1 Dyn anzieht oder abstößt. Damit verlangen wir, dass auf einer Kugelfläche mit diesem Halbmesser, die den Pol zum Mittelpunkte hat, überall die Feldstärke 1 herrsche, und dass also von jedem Einheitspole 4π Kraftlinien ausgehen. Dasselbe gilt auch für den zweiten Pol, und daher gehen vom Einheitsmagneten 8π Kraftlinien aus. Im Sinne der Kraftlinientheorie Faradays aufgefasst, sind aber die Pole nicht die Ausgangspunkte der Kraftlinien. Die Pole kommen nur dadurch zustande, dass wir die kreisförmig geschlossenen Kraftlinien beim einen Ende eintreten und beim anderen Ende austreten lassen und ihre Richtung gegen das Innere des Magneten bis zum Durchschnitte verlängern. Durchziehen so B Kraftlinien jeden cm^2 des Querschnittes q eines Magneten, also im Ganzen qB, so müssen wir jedem Pole $m = qB : (8\pi)$ Einheiten zuschreiben, damit von beiden Polen qB Kraftlinien ausgehen können.

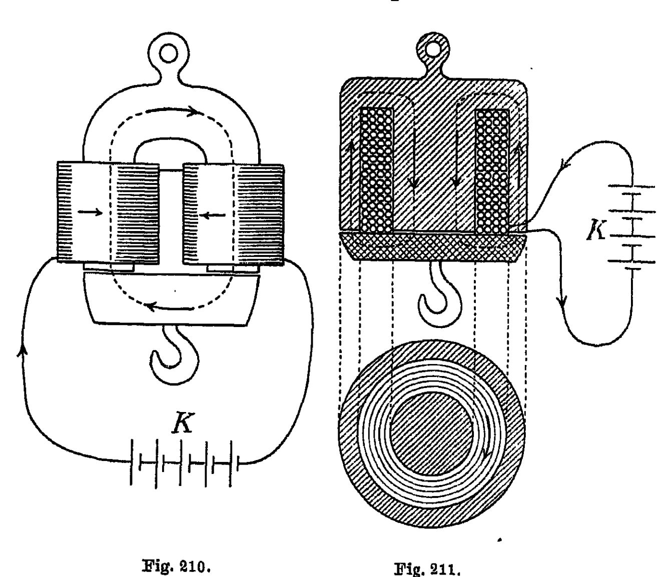


Fig. 210. Fig. 211.

Wenn sich ein Pol mit m Einheiten in einem Felde von der Stärke B befindet, so sucht er sich mit der Kraft von mB Dyn in der Richtung des

Feldes zu bewegen, und zwei Magnete, die durch qB Kraftlinien miteinander verbunden sind, ziehen sich also gegenseitig mit einer Kraft an von $\frac{qB}{8\pi} \cdot B = \frac{qB^2}{8\pi}$ Dyn $= \frac{qB^2}{8\pi \cdot 981000}$ kg $= 405 \cdot 10^{-10} \cdot qB^2$ kg.

Den Elektromagneten gibt man häufig die Gestalt eines Hufeisens (Fig. 210); die punktierte Linie gibt den Kraftlinienverlauf an. Noch günstiger ist die Construction der Elektromagnete nach Romershausen (Fig. 211), da in diesem Falle die Kraftwirkung nach allen Seiten symmetrisch vertheilt ist und damit auch der Gefahr des Abreißens nach allen Seiten gleichmäßig vorgebeugt wird. Auch die schädliche „Streuung“ der magnetischen Kraftlinien wird dadurch am besten verhindert. Die Tragkraft eines Elektromagneten lässt sich nach der obigen Formel berechnen, wenn wir die Stärke der Induction B ermittelt haben.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass für die Stärke der Induction in einem geschlossenen Eisenringe ein ähnliches Gesetz besteht wie das Ohm'sche Gesetz für die elektrischen Ströme. Wir bewickeln einen geschlossenen Eisenring R (Fig. 212) mit n Windungen eines Drahtes und schicken durch denselben einen elektrischen Strom von i' absoluten Stromeinheiten. Die so entstehenden Kraftlinien verlaufen ihrer ganzen Länge nach im Eisen.

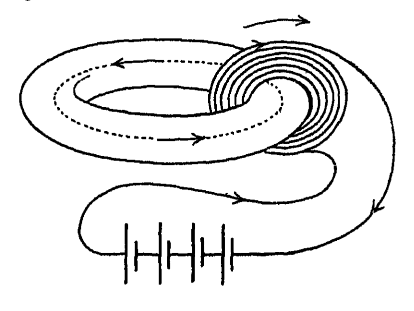


Fig. 212.

Die „magnetomotorische Kraft“ des Stromes ist innerhalb gewisser Grenzen der Zahl der Windungen n und der Stromstärke i proportional und gleich $4\pi n i'$.

Die veränderliche Magnetisierbarkeit verschieden langer Elektromagnete zwingt uns zur Annahme, dass auch die Erzeugung eines magnetischen, wie die eines elektrischen Stromes einem gewissen Widerstande begegnet, welcher der Länge l des Stromkreises direct und dem Querschnitte q, sowie auch der Permeabilität μ des Eisens verkehrt proportional ist. Diesen magnetischen Widerstand des Eisens bezeichnet man als „Reluctanz“ R und der Wert derselben ist also $R = \frac{l}{\mu q}$.

Wie wir früher das Ohm'sche Gesetz durch die Formel $e = iw$ zum Ausdrucke gebracht haben, so setzen wir jetzt $4\pi n i' = \Phi R$, wobei Φ den Strom der magnetischen Kraftlinien darstellt, weshalb $\Phi = qB$. Wir können daher die obige Gleichung auch in der Form anschreiben;

$$4\pi n i' = \frac{\Phi l}{q\mu} = B \cdot \frac{l}{\mu}.$$

Wenn wir die Stromstärke i' nicht in absoluten Einheiten messen, sondern in Ampère, so nimmt die Formel wegen $i' = i : 10$, da die Maßzahl der in Ampère ausgedrückten Stromstärke 10 mal größer ausfällt, die Form an $0{\cdot}4\pi n i = 1{\cdot}257\, ni = Bl : \mu$ oder $ni = 0{\cdot}796\, Bl : \mu$.

Wollen wir z. B. einen hufeisenförmigen Elektromagnet construieren, der 200 kg trägt, so muss nach der für die Tragkraft der Elektromagnete angegebenen Formel für jede Polfläche die Gleichung bestehen:

$$100 \text{ kg} = B^2 q \cdot 405 \cdot 10^{-10}.$$

Nehmen wir einen Querschnitt von $q = 100 \text{ cm}^2$, so ergibt sich für:

$$B^2 = 10^{10} : 405 = 2{\cdot}47 \cdot 10^7 \quad \text{und} \quad B = 4970.$$

Bei einer Dichte der Kraftlinien von 5000 pro cm^2 finden wir aber in der früher angeführten Tabelle, dass bei gutem Schmiedeeisen $\mu = 3000$, und daher ist dann $n\,i = 1{\cdot}33\,.\,l$. Wir können z. B. die Gasammtlänge des Kraftlinienweges $l = 100$ cm wählen, und finden so, dass bei 1 Ampère Stromstärke $n = 133$, d. h. ein solcher Elektromagnet braucht nur 133 Windungen zu erhalten, um bei einer Stromstärke von 1 Ampère 200 kg Tragfähigkeit zu besitzen.

Für praktische Fälle muss man die Tragkraft im Interesse der Sicherheit immer bedeutend höher bemessen, als die Formel es verlangt, da sich die Ankerflächen nicht genau an die Pole des Elektromagneten anlegen und dann die dazwischen liegende Luftschichte die Zahl der sich entwickelnden Kraftlinien wesentlich herabdrückt.

Die elektromagnetischen Einheiten. Die Entstehung eines Inductionsstromes ist immer mit einer gegenseitigen Durchschneidung des Leiters und der magnetischen Kraftlinien verbunden. Wenn wir bei dem ersten Versuche über Induction (Fig. 208) den Magnet in die Spule II hineingeben, so durchschneiden die von ihm ausgehenden Kraftlinien alle Windungen dieser Spule und zwar beim Hineinschieben von einer anderen Seite als beim Herausziehen. Drehen wir ferner den Erdinductor im erdmagnetischen Felde, so werden die Kraftlinien von seinen Windungen durchschnitten, und daher erhalten wir den Inductionsstrom. Erzeugen wir endlich mittelst eines großen Elektromagneten ein sehr starkes Feld (Fig. 213) und bewegen wir durch dasselbe

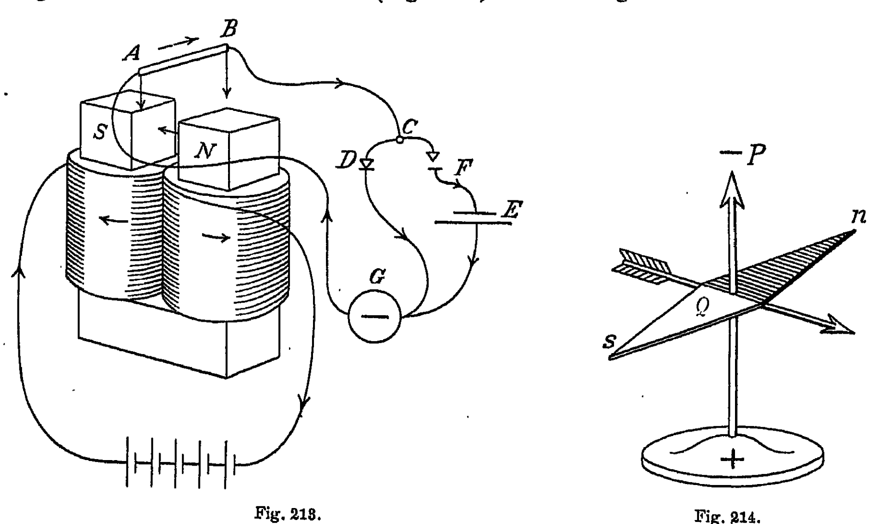


Fig. 213.

Fig. 214.

ein Leiterstück AB in der Richtung der Pfeile, so zeigt das Galvanometer G durch einen Ausschlag die Entstehung eines Inductionsstromes an, wenn wir den Punkt C der Leitung mit D verbinden. Stellen wir dagegen eine Verbindung zwischen C und F her, so gibt uns das galvanische Element E die Richtung des Stromes an, wenn der Ausschlag nach derselben Seite erfolgt. Der inducierte Strom hat die Richtung des Pfeiles, wenn wir den Leiter durch das magnetische Feld von oben nach unten bewegen; dagegen erhalten wir einen Ausschlag nach der entgegengesetzten Seite, wenn wir den Leiter wieder zurück von unten nach oben bewegen. Um sich diese Wechselbeziehung zwischen der Richtung des magnetischen Feldes, der Bewegungsrichtung und der Richtung des inducierten Stromes leichter zu merken, kann man sich der sogenannten Flemming'schen Regel bedienen. Wir geben dem Zeigefinger, Mittelfinger und Daumen der rechten Hand die Richtungen dreier aufeinander

senkrecht stehender Geraden, stellen den Zeigefinger so, dass er im magnetischen Felde in der Richtung der Kraftlinien, also gegen den Südpol weist, und der Daumen die Bewegungsrichtung angibt. Dann zeigt der Mittelfinger die Richtung des elektrischen Stromes an. Verbinden wir mit einer Magnetnadel einen Pfeil, wie es Fig. 214 zeigt, so gibt also die nach oben weisende Spitze P die Richtung des inducierten Stromes an, wenn der Leiter mit paralleler Stellung in der Richtung des Pfeiles verschoben wird.

Wir wählen die absolute Einheit der elektrischen Spannung so, dass der Effect, der mit der Verschiebung eines Leiters von der Länge 1 cm in einem magnetischen Felde von der Intensität 1 verbunden ist, gerade 1 Erg pro Secunde beträgt, wenn dieses Leiterstück in der Secunde die Fläche eines cm^2 senkrecht zur Kraftlinienrichtung beschreibt.

Hätten wir ein magnetisches Feld zur Verfügung, das eine Intensität $H = 10000$ Kraftlinien pro cm^2 besitzt und sich über 1 m^2 ausdehnt, so würde in einem Leiter von 1 m Länge, der in einer Secunde über diese Feld hinweggeschoben wird, ungefähr dieselbe elektromotorische Kraft inducier wie sie ein Daniellelement gibt. Als Einheit der elektromotorischen Kraft wählten wir oben diejenige, welche bei der Verschiebung eines Leiterstückes von 1 cm Länge mit der Geschwindigkeit 1 in einem Felde von der Intensität 1, oder beim Durchschneiden einer einzigen Kraftlinie pro Secunde induciert wird; da also in einem 100 mal längeren Leiter bei einer 100 mal größeren Geschwindigkeit in einem 10000 mal stärkeren Felde ungefähr dieselbe elektromotorische Kraft induciert wird wie die eines Daniellelementes und dabei 10^8 absolute Einheiten der elektromotorischen Kraft geliefert werden, so bezeichnen wir 10^8 absolute Spannungseinheiten als ein Volt.

Wir geben ferner dem Stromkreise einen solchen Widerstand, dass der nach dem Ohm'schen Gesetze berechnete Strom mit der absoluten Spannungseinheit multipliciert, die Einheit des Effectes gibt. Die absolute Stromeinheit soll also mit der absoluten Spannungseinheit die Effecteinheit, d. h. ein Erg pro Secunde ergeben, und 10^8 absolute Spannungseinheiten sollen mit 10^x absoluten Stromeinheiten ein Watt oder 10^7 Erg pro Secunde geben. Aus $10^8 . 10^x = 10^7$ folgt aber $x = -1$, und daher wurde der zehnte Theil der absoluten Stromeinheit als praktische Einheit der Stromstärke gewählt und als ein Ampère bezeichnet.

Mit der Festsetzung der Spannungs- und Stromeinheit ist aber nach dem Ohm'schen Gesetze auch die Widerstandseinheit gegeben. Sie ist jener Widerstand, bei dem die absolute Spannungseinheit die absolute Stromeinheit gibt. Desgleichen muss ein Volt bei der praktischen Einheit des Widerstandes $= 10^x$ absoluten Widerstandseinheiten ein Ampère Strom geben, also muss auch die Gleichung bestehen: $10^8 = 10^{-1} . 10^x$. Es müssen also 10^9 absolute Widerstandseinheiten die praktische Einheit, nämlich das Ohm geben.

Damit sind also die absoluten, wie auch die praktischen Einheiten so festgestellt, dass auch für die Einheiten das Ohm'sche Gesetz gilt, und dass das Product aus Spannung und Strom den in Watt gemessenen Effect angibt.

Das Lenz'sche Gesetz. Schon bei den Vertheilungserscheinungen haben wir gesehen, dass dieselben immer so erfolgen, als würde das Medium, welches dieselben hervorruft, immer auf einen Ausgleich der eintretenden Störungen hinarbeiten. Dem positiv geladenen Conductor nähert sich im benachbarten Leiter eine negative Ladung und setzt so die Feldstärke in der ganzen Umgebung herab. Auch die Inductionsströme zeigen diesen

Charakter. Wenn wir einen Magnet in eine Spule einführen, die einen geschlossenen Stromkreis bildet, so hat der inducierte Strom eine solche Richtung, dass sein magnetisches Feld den Magnet abstoßen würde. Die bei der Überwindung dieses Widerstandes geleistete Arbeit ist das mechanische Äquivalent des inducierten Stromes. Ziehen wir den Magnet aus der Spule wieder heraus, so entsteht ein Strom, welcher den Magnet zurückzuhalten sucht, und dieser Inductionsstrom hört sofort wieder auf, wenn wir diesen Zug nicht überwinden.

Alle diese Erscheinungen zusammenfassend, hat Professor Lenz in Petersburg im Jahre 1834 den Satz aufgestellt: Die durch Induction erzeugten Ströme nehmen immer eine solche Richtung an, dass sie der inducierenden Bewegung entgegenarbeiten.

Stecken wir zwei Spulen in einander, und verbinden wir die innere mit einer galvanischen Kette, so erhalten wir beim Schließen des Stromes in der äußeren Spule einen Inductionsstrom von der entgegengesetzten, und beim Öffnen einen solchen mit der gleichen Richtung. Ersterer arbeitet also dem eindringenden Strome entgegen, letzterer sucht die Wirkung der Unterbrechung aufzuheben. Diese vom umgebenden magnetischen Felde ausgehende Wirkung macht sich aber nicht nur in der secundären, sondern auch in der primären, vom Batteriestrome selbst durchflossenen Spule geltend. Im ersteren Falle spricht man von einer wechselseitigen Induction, im zweiten von Selbstinduction. Die Richtung aller dieser Inductionsströme bestimmt man am einfachsten nach dem eben angegebenen Lenzschen Gesetze.

Der Inductionscoëfficient. Um die Einheit der elektromotorischen Induction abzuleiten, haben wir einen Leiter von der Länge 1 cm mit der Geschwindigkeit von 1 (cm sec^{-1}) in einem Felde von der Intensität 1 verschoben. Leiten wir aber in die Spule I einen Strom, der in einer Secunde von 0 bis zu 1 Ampère ansteigt, dann wird sich in der Spule II eine gewisse elektromotorische Kraft einstellen, deren Maßzahl wir als den Coëffi-

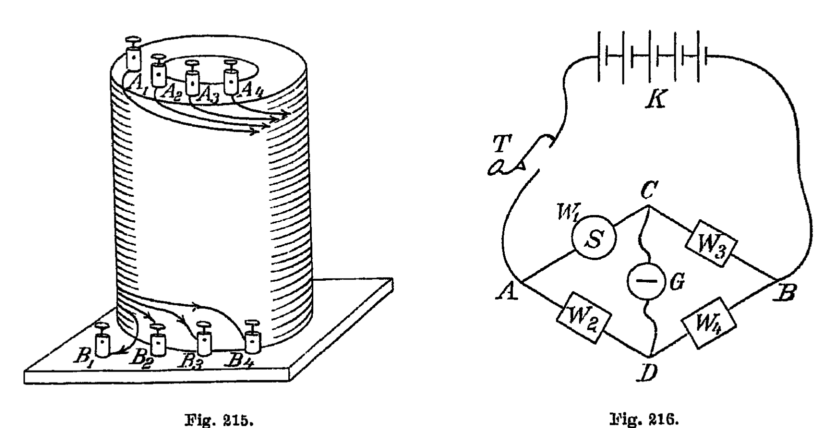


Fig. 215. Fig. 216.

cienten der wechselseitigen Induction bezeichnen. Dieser Coëfficient hängt in erster Linie vom Producte der Windungszahlen beider Spulen ab, ferner von der Beschaffenheit des magnetischen Feldes, und nimmt umsomehr zu, je eisenreicher dasselbe und je permeabler die Eisensorte ist.

Um den Einfluss des Inductionscoëfficienten zu zeigen, kann man sich einer Inductionsrolle bedienen, die folgendermaßen eingerichtet ist (Fig. 215). Auf einer Spule sind vier gleichlange Stücke umsponnenen Kupferdrahtes mit der gleichen Anzahl von Windungen, alle im gleichen Sinne aufgewickelt, und ihre Enden führen zu den Klemmen A und B. Verbinden wir die Klemme B_1 mit A_2 und die Enden A_1 und B_2 mit einer Batterie, ferner B_3 mit A_4 und die Klemmen A_3 und B_4 mit einem ballistischen Galvanometer, so erhalten wir beim Schließen des Batteriestromes einen doppelt so großen Ausschlag, als wenn wir nur den Draht $A_3 B_3$ mit dem Galvanometer verbunden hätten. Lassen wir dagegen den primären Strom nur durch die Windungen $A_1 B_1$ fließen, so ist die Inductionswirkung ebenfalls nur halb so groß als früher. Damit haben wir die Wirkung der wechselseitigen Induction gezeigt.

Um die Wirkung der Selbstinduction zu zeigen, können wir folgenden Versuch anstellen. Wir schalten die früher erwähnte Inductionsspule mit vier anderen Widerständen und einem ballistischen Galvanometer in den Stromkreis einer Kette K, wie es Fig. 216 zeigt, und schließen durch Niederdrücken des Tasters T den Stromkreis. Haben wir dabei an der Spule B_1 mit B_2, A_2 mit A_3, B_3 mit B_4 und A_1 und A_4 mit A und C verbunden, so können wir die Widerstände w_2, w_3 und w_4 so abgleichen, dass zwischen C und D kein Strom fließt, wenn wir den Taster schließen. Dies ist der Fall, wenn $w_1 : w_2 = w_3 : w_4$, falls w_1 den Widerstand der Spule bedeutet. Damit haben wir die Wheatstone'sche Brücke hergestellt, wie man sie zum Messen des Widerstandes der Spule verwendet. Verbinden wir dann B_1 mit A_2, B_2 mit A_3, B_3 mit A_4 und endlich A_1 und B_4 mit A und C, so bekommen wir beim Schließen und Öffnen des Stromes immer einen vorübergehenden Ausschlag im Galvanometer G. Da dieser Strom wegen des gewählten Verhältnisses der Widerstände nicht von der Batterie kommen kann, so muss die elektromotorische Kraft der Selbstinduction diese Stromstöße veranlasst haben. Der Ausschlag wird halb so groß, wenn wir an der Spule B_1 mit A_2, B_2 mit A_3, B_3 mit B_4 und endlich A_1 und A_4 mit A und C verbinden.

Bei der ersten dieser drei Schaltungen floss der Strom zweimal im gleichen und zweimal im entgegengesetzten Sinne durch die Spule, und daher entstand kein magnetisches Feld, also auch keine Induction. Die Spule war also inductionsfrei. So müssen auch die in den Widerstandskästen zusammengestellten Widerstände beschaffen sein, damit sie, in einen Stromkreis geschaltet, beim Öffnen und Schließen nicht elektromotorische Kräfte entwickeln. Dies erreicht man hier durch die bifilare Wicklung, d. h. der ganze Draht wird zu einer Schleife zusammengelegt und so aufgewickelt, dass der Strom gleichvielmal im einen wie im anderen Sinne durch die Windungen fließt.

Im zweiten Falle wurden alle Windungen so hintereinander geschaltet, dass der Strom immer im selben Sinne um die Spule fließt und daher ein entsprechend starkes Feld erzeugt: in diesem Falle tritt die Induction am stärksten auf. Im letzten Falle haben wir drei Drahtstücke im gleichen Sinne und eine dagegen geschaltet, so dass sich die Wirkungen zweier gegenseitig aufheben, während die beiden übrigen nur die halbe Inductionswirkung hervorrufen.

Der Strom, welcher beim Öffnen einer inductiv geschalteten Spule entsteht, erzeugt einen lebhaften Funken, da dieser Inductionsstrom gerade

während der Unterbrechung zustande kommt. Dieser beim Öffnen eines Stromkreises sichtbare „Öffnungsfunken“ wurde von Faraday dem sogenannten „Extrastrome“, wie er den Inductionsstrom nannte, zugeschrieben.

Unter dem Selbstinductionscoëfficienten versteht man die elektromotorische Kraft, welche der inducierende Strom im Leiter selbst induciert, wenn er mit gleichmäßiger Geschwindigkeit in einer Secunde um 1 Ampère anwächst oder abnimmt. Aus dem letzten Versuch ergibt sich, dass dieser Wert mit dem Quadrate der Windungen zunimmt, weil hier stets doppelt soviele Windungen nicht auf die gleiche Anzahl, sondern wieder auf die doppelte Windungszahl inducierend einwirken.

Alle diese Inductionserscheinungen treten viel stärker auf, wenn sich weiches Eisen im magnetischen Felde befindet.

Der Wechselstrom. Um einen dauernden elektrischen Strom zu erhalten, können wir uns einer galvanischen Kette, einer Accumulatorenbatterie oder endlich einer Thermosäule bedienen. Die Induction ist nicht geeignet, in einem einfachen Leiterkreise dauernd einen Strom von unveränderlicher Richtung zu erzeugen, weil wir einen Theil des Stromleiters in einem Felde von fortwährend zunehmender Stärke bewegen müssten, was ja auf die Dauer praktisch nicht durchführbar ist. Wenn wir aber den Leiter wieder aus dem Felde entfernen, so entsteht sofort ein Strom von entgegengesetzter Richtung. Mit Hilfe eines magnetischen Feldes können wir also in einem einfach geschlossenen Stromkreise durch Induction nur Ströme hervorrufen, deren Richtung fortwährend wechselt. Im Gegensatze zu einer solchen Reihe von Strömen mit fortwährend wechselnder Richtung bezeichnet man einen Strom von unveränderlicher Richtung, wie ihn jede galvanische Kette liefert, als einen Gleichstrom. Unter Wechselstrom versteht man dagegen einen durch Induction hervorgerufenen, und seiner Richtung und Intensität nach periodisch sich ändernden Strom. Einen solchen Wechselstrom erhalten wir z. B., wenn wir den Erdinductor fortwährend um eine verticale Achse im erdmagnetischen Felde drehen. Solche Ströme lassen sich aber mit Hilfe einer Magnetnadel nicht nachweisen, weil sich dieselbe abwechselnd bald nach der einen, bald nach der anderen Richtung drehen müsste. Wohl aber kann man die durch den Strom erzeugte Wärme als Maßstab der Stromstärke benützen, da die Erwärmung von der Richtung des Stromes unabhängig ist.

In dem zwischen zwei Magnetpolen N und S (Fig. 217) befindlichen Felde drehe sich um die Achse AB ein Stromleiter von der Form einer kreisförmigen Schlinge, deren Enden zur Bewicklung eines Eisenringes führen. Durch Anwendung der Flemming'schen Regel kann man die Richtung der Ströme ermitteln, welche besonders an den Stellen C und D induciert werden. Sie führe an beiden Stellen zu jener Stromrichtung, wie sie durch die Pfeile angedeutet ist. In der Stellung OG ist die Induction am stärksten; ihre elektromotorische Kraft sei jetzt $OQ = e$; in der Stellung OF ist sie gleich Null, weil der Leiter in dieser Stellung bei der Drehung keine Kraftlinie durchschneidet. In jeder Zwischenlage entspricht die Induction der Componente, welche in die Richtung OG fällt, und diese ist beim Winkel α gleich $e \,.\, \sin \alpha = PQ$. Die während einer ganzen Umdrehung auftretenden Inductionen können wir in der Weise graphisch darstellen, dass wir auf der Abscisse OX nach irgend einem Maßstabe den Phasenwinkel, und in einer darauf senkrechten Richtung die inducierte elektromotorische Kraft $PQ = e \,.\, \sin \alpha$ auftragen. Den Winkel α bezeichnen wir als die Phase der so inducierten elektromotorischen Kraft. Die Endpunkte der in den einzelnen Phasen bald nach oben, bald nach unten gerichteten Inductionswerte bilden die sogenannte Sinuslinie. Wäre der Stromkreis inductionsfrei, so würde bei der stärksten elektromotorischen Kraft auch der stärkste Strom entstehen, und wenn wir denselben in ähnlicher Weise als Ordinaten auftragen, so würden wir eine zweite Sinuslinie mit derselben Phase erhalten.

Das Auftreten eines solchen Stromes ruft aber infolge der Selbstinduction eine zweite elektromotorische Kraft $OQ' = e'$ hervor, deren Intensität sich auch in einer Sinuslinie bewegt, aber einen anderen Phasenwinkel besitzt.

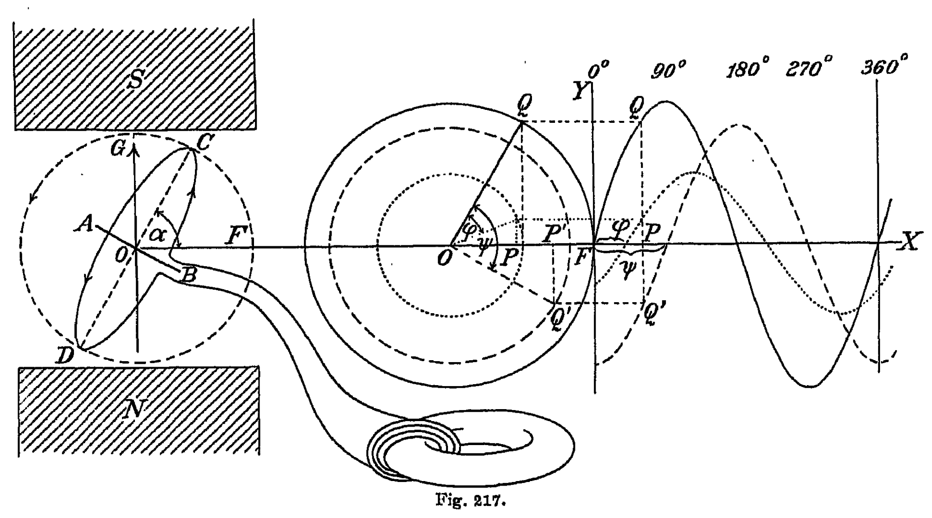


Fig. 217.

Die Ordinaten beider Vectoren ergeben sich, wenn wir die um O sich drehenden Vectoren $e = OQ$ und $e' = OQ'$ auf die Ordinatenachse projicieren. Der Winkel ψ, den beide Vectoren miteinander einschließen, gibt den Phasenunterschied zwischen der durch das magnetische Feld und der durch Selbstinduction zustandekommenden elektromotorischen Kraft an. Der Wechselstrom, der wirklich entsteht, ist das Resultat dieser beiden elektromotorischen Kräfte und gibt wieder eine Sinuslinie, deren Vector mit dem Vector $OQ = e$ einen Winkel φ einschließt. Ist die größte Stromstärke i, so ist sie in einem bestimmten Augenblicke $i \,.\, \sin(\alpha - \varphi)$, während die inducierte elektromotorische Kraft $e \,.\, \sin\alpha$ ist.

Der Stromeffect hängt jetzt nicht nur von e und i ab, sondern vom Werte des Productes $ei \cos\varphi$ und daher kann er, wenn $\varphi = 90^0$, den Wert Null annehmen. Dann spricht man von einem „wattlosen" Strom. Infolge der Selbstinduction wird die Stromstärke so vermindert, als ob der Widerstand zugenommen hätte, und diesen scheinbar erhöhten Widerstand im Wechselstromkreise bezeichnet man als „scheinbaren Widerstand" oder „Impedanz" im Gegensatze zum wahren Widerstande oder der „Reactanz".

Der Einfluss der Selbstinduction auf die Stromstärke in einem Wechselstromkreise lässt sich durch folgende Versuche zeigen. Verfügen wir über einen Wechselstrom, der eine Glühlampe bis zur normalen Helligkeit zum Leuchten bringt, so können wir diesen Strom zuerst in die Spule Fig. 215 und von hier in die Lampe leiten. Schalten wir die Spule inductionsfrei, so wird die Leuchtkraft der Lampe nur durch den Widerstand der vorgeschalteten Spule vermindert. Viel stärker ist dies aber der Fall, wenn wir dieselbe so umschalten, dass sie Induction gibt, und wenn wir dann in den Hohlraum noch Eisendrähte hineingeben, so können wir es durch die damit verbundene Veränderung des Phasenwinkels dahin bringen, dass der Strom nahezu „abgedrosselt" wird und die Lampe zu leuchten aufhört.

Der Transformator. W stelle in Fig. 218 eine Wechselstrommaschine vor, deren Strom wir zuerst in eine Lampe L und dann noch durch die Windungen einer Spule I leiten, die um einen ringförmig geschlossenen Eisenkern gewickelt ist. Um den anderen Schenkel dieses Eisenringes ist die Spule II gewickelt, die wir im Gegensatze zu ersterer, der primären Bewicklung, als die secundäre bezeichnen wollen. Besteht die Bewicklung der Spule I aus zwei gleichen Theilen, welche inductionsfrei aneinandergeschlossen sind, so wird die Lampe L fast normal

leuchten; sie wird aber viel schwächer leuchten, wenn die durch den Eisenkern gesteigerte Induction zur Geltung kommt. So oft dabei durch die Inductionsspule I ein Strom fließt, werden sich im geschlossenen Eisenringe magnetische Kraftlinien entwickeln, und der elektrische und der magnetische Stromkreis werden wie zwei Glieder einer Kette ineinander greifen.

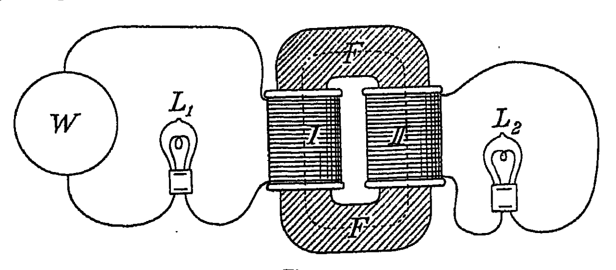


Fig. 218.

Da das Eisen für die magnetischen Kraftlinien mehrere tausendmal durchlässiger ist, als die Luft, so gehen nur wenige von den in der Bewicklung I erzeugten Kraftlinien durch „Streuung" verloren, ehe sie in der Spule II einen Inductionsstrom hervorrufen können; das inducierende magnetische Feld wird also hier nur wenig schwächer sein, als das in der Bewicklung I. Das Entstehen und Verschwinden des magnetischen Feldes in der Spule II ruft aber in derselben nur dann einen Wechselstrom hervor, wenn die Enden des Bewicklungsdrahtes mit einer Lampe L_2 verbunden werden, und damit der Stromkreis geschlossen ist. Auch hier treten die Inductionsströme mit einer neuen Phasenverschiebung auf, und suchen in jeder Periode die ansteigende Magnetisierung zurückzudrängen und den abnehmenden Magnetismus zu heben.

Die elektromotorische Kraft der secundären Bewicklung ist annäherungsweise gleich der Potentialdifferenz an den Enden der primären, wenn die Zahl der Windungen in beiden Bewicklungen gleich groß und die Streuung der Kraftlinien nicht stark ist. Wenn wir den Eisenring mit einer dritten und vierten Bewicklung von gleicher Windungszahl versehen würden, so würde auch in diesen dieselbe elektromotorische Kraft auftreten; wir können also auch die zwei-, beziehungsweise dreifache elektromotorische Kraft in der secundären Bewicklung erzielen, wenn wir ihr zwei-, beziehungsweise dreimal so viele Windungen geben. Wollen wir z. B. bei einem Wechselstrome die Spannung von 100 Volt in eine solche von 1000 Volt verwandeln, so müssen wir die secundäre Bewicklung mit 10mal mehr Windungen versehen als die primäre. Man sagt dann, der Wechselstrom sei „hinauftransformiert" worden. Wenn man dagegen einen Wechselstrom von 2000 Volt in die primäre Bewicklung eines Transformators leitet und die secundäre 20mal weniger Windungen besitzt, so erhalten wir an ihren Klemmen eine Spannung von 100 Volt, wie sie gewöhnlich zur Beleuchtung mit Glühlampen verwendet wird.

Da beim Hinauftransformieren der Spannung die Arbeitsleistung des secundären Stromkreises im günstigsten Falle der im primären gleichkommt, so muss die Stromstärke ebensovielmal kleiner werden, als dabei die Spannung zugenommen hat. Gut construierte Transformatoren übertragen mehr als 90 % von der primären auf die secundäre Bewicklung. Die unvermeidlichen Verluste sind theils durch die magnetische Streuung, theils auch dadurch bedingt, dass das fortwährende Ummagnetisieren des Eisens ebenfalls mit einem Arbeitsaufwande verbunden ist, den der Primärstrom zu leisten hat.

Anwendungen des Elektromagnetismus.

Die praktischen Anwendungen des Elektromagnetismus zerfallen in zwei Hauptgruppen, in die Schwachstromtechnik und in die Starkstromtechnik. Dieser Unterschied ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass die Anwendung sehr starker Ströme ganz andere constructive Hilfsmittel in Anspruch nimmt, als es bei schwächeren Strömen der Fall ist. Beide Gebiete haben sich bereits zu umfangreichen Specialwissenschaften ausgebildet und sind die beiden Hauptzweige der Elektrotechnik.

Schwachstromtechnik.

Die elektrische Hausklingel. Als elektromotorische Kraft verwendet man gewöhnlich mehrere Leclanché-Elemente; die Stromleitung ist nur beim Taster T unterbrochen und wird durch Niederdrücken desselben geschlossen. Die mit der Klemme F verbundene Leitung (Fig. 219) führt den Strom zuerst in die Bewicklung des Elektromagneten und dann zum Metallstück B, an welchem eine Stahlfeder befestigt ist, die den Anker A trägt. Bei der normalen Stellung derselben befindet sich der Anker in einiger Entfernung von den Polen des Elektromagneten E, während andererseits die am Punkte D angeschlossene Leitung zu einer verstellbaren Schraube führt, welche mit der Feder den Contact C bildet. Wird also mittels des Tasters T der Stromkreis geschlossen, so wird der Anker vom Elektromagneten angezogen und dadurch der Contact bei C unterbrochen. Diese Unterbrechung dauert aber nur so lange Zeit, als die Feder braucht, um eine Schwingung auszuführen; dann erfolgt wieder eine neue Anziehung und so wird die Feder fortwährend in Schwingungen erhalten, und dabei schlägt der Klöppel regelmäßig an die Glocke G.

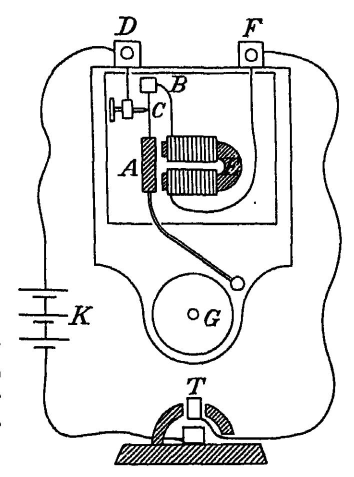


Fig. 219.

Der elektrische Telegraph. Das Bestreben zwischen zwei sehr entfernten Orten einen unmittelbaren Gedankenaustausch zu ermöglichen, ist schon sehr alt, und wurde wiederholt durch Lichtsignale versucht. Abgesehen von den verschiedenartigsten Hindernissen, welchen das optische Signalwesen ausgesetzt ist, haftet ihm besonders die Schwierigkeit an, dass der Empfang der Mittheilung die ununterbrochene Aufmerksamkeit eines Beobachters erfordert. Gerade die selbstthätige Registrierung der Mittheilung an der Empfangsstation bildet den Hauptvorzug der elektrischen Telegraphie.

Der erste elektromagnetische Telegraph wurde von Gauß und Weber im Jahre 1833 construiert, um einen unmittelbaren Verkehr zwischen der Universität Göttingen und ihrer Sternwarte herzustellen. Beide Endstationen waren durch eine Doppelleitung miteinander verbunden; der Zeichengeber bestand aus einem feststehenden Magneten, über den eine Inductionsspule geschoben wurde. Die Empfangsstation war ein Multiplicator, dessen Magnetnadel bald nach der einen, bald nach der anderen Seite abgelenkt wurde.

Im Jahre 1837 erfand Morse den Stiftschreiber oder Zeichendrucktelegraphen, bei dem ein Taster den Stromkreis einer galvanischen Batterie

schließt. Der Empfänger ist ein Elektromagnet, der durch die Magnetisierung einen Hebel in Bewegung setzt und damit einen Stift gegen einen Papierstreifen drückt. Letzterer wird durch ein Uhrwerk mit gleichförmiger Geschwindigkeit weitergeschoben, sobald das Signal zum Beginne des Telegrammes ankommt. Da die Herstellung der aus Kupferdrähten bestehender Telegraphenleitung weitaus die größten Kosten verursacht, so war es eir großer Fortschritt in der Entwicklung des Telegraphenwesens, als Steinheil ir München im Jahre 1838 die Entdeckung machte, dass man sich die Rückleitung ersparen könne, wenn man die Enden der Stromleitung „an Erde' legt und diese daher scheinbar als Rückleitung benützt. Die Batterie wirkt dann wie ein Pumpwerk, welches das Wasser durch eine Röhre von einem See in einen anderen treibt, ohne dass es von dort wieder zurückfließt. Die Schaltungsweise an beiden Stationen ist aus Fig. 220 ersichtlich. Wenn vor

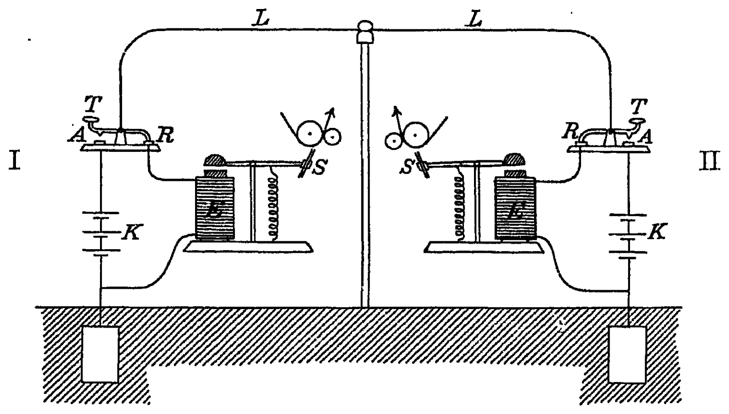


Fig. 220.

der Station I nach der Station II telegraphiert wird, so liefert die Kette K der ersteren Station den Strom und der Ruhecontact R der zweiten Statior stellt die Verbindung mit der Erde her. Der Schreibapparat wird also ers dann in Thätigkeit versetzt, wenn beim Niederdrücken des Tasters T dei Station I die Batterie K eingeschaltet wird. Bei dieser Schaltung könner also Telegramme nach beiden Richtungen, wenn auch nicht zur gleichen Zeit entsendet werden. Wird die Schaltung so eingerichtet, dass auch diese möglich ist, so spricht man von Duplextelegraphie, bei der also ein unc dieselbe Leitung doppelt so stark ausgenützt wird. Ein anderes Mittel, ur die Betriebskosten herabzudrücken, besteht darin, dass man, um dünnere Drähte verwenden zu können, die Empfangsstation so empfindlich macht dass auch noch sehr schwache Ströme zur Übertragung hinreichen. In diesem Falle benützt man den ankommenden Strom nur dazu, um im „Relais" einer sehr leicht beweglichen Hebel in Bewegung zu setzen, der das Öffnen unc Schließen einer „Localbatterie" besorgt, und diese setzt dann erst den Schreibapparat in Bewegung.

Bei der transatlantischen Telegraphie werden die beiden Stationen durch ein in das Meer versenktes „Kabel" miteinander verbunden, das viele in Guttapercha gebettete Leitungsdrähte enthält. Das Meerwasser bildet mit den durch einen Isolator von ihm getrennten Leitungen einen Condensator von ungeheueren Dimensionen dessen Ladung und Entladung bei jedem Zeichen eine längere Zeit in Anspruch nimmt. Die Empfangsstation besteht wieder aus einem Multiplicator, dessen Magnet

nadel mit einem Spiegel verbunden ist. Letzterer reflectiert bei jeder Ablenkung einen Lichtstrahl bald nach rechts, bald nach links, und aus diesen Bewegungen wird wie beim Stiftschreiber aus Strichen und Punkten ein Alphabet zusammengesetzt.

Der von Hughes im Jahre 1859 erfundene Typendruckapparat enthält alle Buchstaben und Ziffern, die wie mit Lettern auf Papierstreifen abgedrückt werden können. Beim Beginne der Depesche setzen sich zwei Uhrwerke gleichzeitig in Bewegung und theilen die Zeit in gleichzeitig verlaufende Zeitintervalle, während welcher alle Zeichen der Reihe nach zum Abdrucke zur Verfügung gestellt werden. Der Apparat an der Aufgabestation sorgt dafür, dass der Stromschluss und seine Wirkung gerade dann erfolgt, wenn das verlangte Zeichen in jedem Intervalle zum Abdrucke bereit steht. Damit ist insoferne ein neuer Vortheil gewonnen, dass diese Apparate nicht die Kenntnis und Einübung eines eigenen Alphabetes voraussetzen und daher auch die Übertragung in eine allgemein lesbare Schrift ersparen. Einen noch weitergehenden Fortschritt in diesem Sinne bildet die Telephonie, die durch die unmittelbare Übertragung der Sprache die Anwendung von Schriftzeichen ganz überflüssig macht.

Das Telephon. Schon im Jahre 1861 versuchte Philipp Reis in Frankfurt a. M. die Schwingungen einer Membrane zur Unterbrechung eines galvanischen Stromes zu benützen, und dieselben in einer größeren Entfernung dadurch hörbar zu machen, dass ein Eisenstäbchen bald stärker, bald schwächer magnetisiert wird. Dabei wurden aber die wellenförmigen Veränderungen der Stimme durch plötzliche Unterbrechungen ersetzt, und der Empfänger vermochte nicht hinreichend starke Luftwellen hervorzurufen. Diese Fehler vermeidet das von Graham Bell im Jahre 1875 erfundene Telephon (Fig. 221). Dringen nämlich durch den Schalltrichter T Luftwellen ein, so wird die dünne Eisenplatte PP in Schwingungen versetzt und damit das vom Magnete NS ausgehende magnetische Feld im Eisenstücke E verstärkt, so oft sich die Eisenplatte demselben nähert, und im gegentheiligen Falle geschwächt. Diese Schwankungen des Magnetismus rufen ähnliche Schwankungen der Stromstärke hervor, welche dann durch die Drähte auf ein zweites, ebenso gebautes Telephon übertragen und dort in Luftschwingungen umgesetzt werden. Abgesehen von einer gewissen Modification der Articulierung durch die Schwingungsformen der Platte, lässt sich so die Stimme in sehr vollkommener Weise auf relativ große Entfernungen übertragen, obwohl die dabei entstehenden Wechselströme außerordentlich schwach sind.

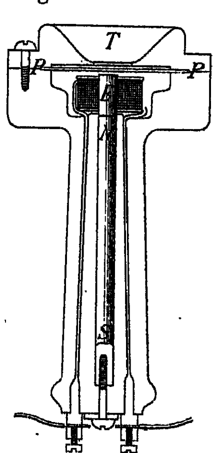
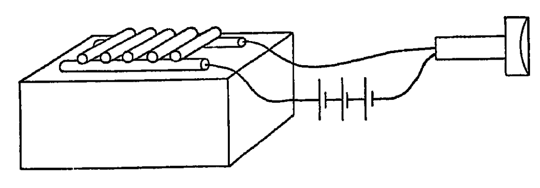


Fig. 221.

Bei der Widerstandsmessung mit Hilfe der Wheatstone'schen Brücke kann man sich statt des Galvanometers auch eines Telephons bedienen, wenn man statt des continuierlichen Stromes einer galvanischen Kette einen Wechselstrom anwendet und durchwegs inductionsfreie Widerstände benützt.

Das Mikrophon. Lüdtge und Hughes haben im Jahre 1878 das erstemal die Schwingungen einer tönenden Platte zur Veränderung des Leitungswiderstandes im Stromkreise verwendet, um auch die Stromstärke entsprechend zu verstärken oder zu schwächen. Der Strom einer galvanischen Kette (Fig. 222)


Fig. 222.

geht einerseits durch das Telephon und dann durch mehrere Kohlenstäbchen, welche ganz locker auf zwei anderen Kohlenstäbchen liegen. Wenn die dünne Platte, auf der die Kohlenstäbchen ruhen, in Schwingungen geräth, so ändert sich dabei der Druck an den Berührungsstellen und damit auch der Widerstand im Stromkreise. Diese Widerstandsschwankungen gehen aber auf die Stromstärke und von dieser auf den Magnetismus im Telephone über, das mittels der Membrane die Luft in entsprechende Schwingungen versetzt.

So schwache Geräusche, wie sie das Streichen eines Pinsels oder das Ticken der Uhr hervorruft, werden durch das Mikrophon viel deutlicher hörbar, als sie durch die Luft dem Ohre vermittelt werden. Die Verbindung des Mikrophons mit dem Telephon gestattet auch die Sprache auf viel größere Distanzen deutlich hörbar zu übertragen, als es mit dem Bell'schen Telephon möglich ist. Im letzteren Falle verwendet man Mikrophone, bei welchen sich hinter einer sehr dünnen Kohlenplatte ein Behälter mit Kohlenkörnern befindet, die im Rhythmus der Tonschwingungen den Widerstand im Stromkreise bald vermehren, bald wieder vermindern. Als Empfänger wird wieder ein gewöhnliches Telephon verwendet.

Das Funkeninductorium. Während beim Transformator ein geschlossener Eisenring die wechselseitige Induction zweier Bewicklungen vermittelt, wird das magnetische Feld der Primärspule beim Inductorium (Fig. 223) durch ein Bündel von Drähten B

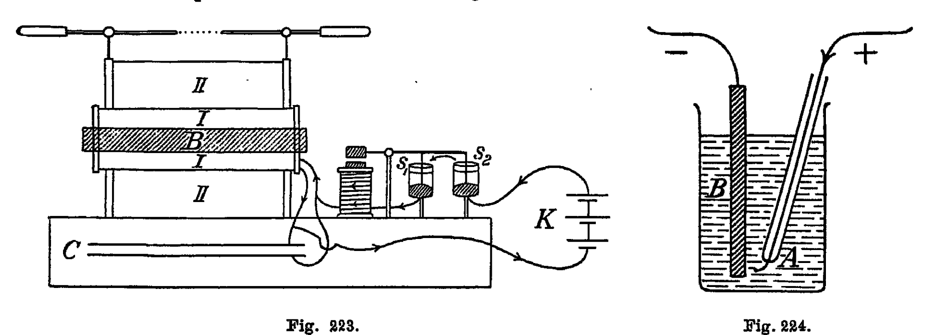


Fig. 223. Fig. 224.

aus dem weichsten Eisen ausgefüllt und damit sehr gestärkt An den beiden Enden der secundären Rolle tritt eine der höheren Windungszahl entsprechende Spannung auf. Der Wechselstrom in der viel größeren secundären Spule wird nicht dadurch hervorgerufen, dass man auch in die primäre Spule einen Wechselstrom leitet, sondern es wird eine ähnliche Wirkung durch das regelmäßige Unterbrechen und Schließen eines Gleichstromes erzielt. Bei den sogenannten Ruhmkorff'schen Funkeninductoren sind eigene Stromunterbrecher angebracht, bei welchen zwei Metallspitzen S_1 und S_2 zwischen zwei Quecksilbernäpfen jedesmal eine leitende Verbindung herstellen, so oft sie gleichzeitig in dieselben eintauchen. Die inducierte elektromotorische Kraft hängt aber nicht nur von der Windungszahl, sondern auch davon ab, mit welcher Geschwindigkeit das magnetische Feld, also auch die Intensität des primären Stromes zu- und abnimmt. Der Unterbrecher soll demnach möglichst plötzliche Unterbrechungen herbeiführen. Um den Oeffnungsstrom schnell zu unterbrechen, bedeckt man die Quecksilberoberfläche mit einer Mischung von Wasser und Alkohol, und an die Enden der Primärleitung wird ein Condensator C angeschlossen, der die Verzögerung der Stromunterbrechung infolge der Selbstinduction einigermaßen hintanhält.

Der neuestens mit bestem Erfolge angewendete elektrolytische Unterbrecher von Wehnelt (Fig. 224) besteht aus einem Glasgefäße, das mit verdünnter Schwefelsäure (20$^0/_0$ Schwefelsäure) gefüllt ist; als Kathode wird eine größere Metallplatte aus Blei oder Kupfer verwendet; die „active" Anode bildet ein Platindraht, der nur wenig aus einer Glasröhre hervorragt und der Kathode nahe gegenübersteht. Der Übergang des Stromes von der einen Elektrode zur anderen wird durch die Gasentwicklung in sehr rascher Aufeinanderfolge vollständig unterbrochen und nach einem

Funken wieder hergestellt. Durch Anwendung aller dieser Mittel gelingt es, die Spannungen bei sehr großen Inductorien so zu steigern, dass sich decimeterlange Funken einstellen.

Bringt man mit Hilfe eines solchen Funkenstromes verdünnte Gase zum Leuchten, so zeigen sich ungefähr dieselben Erscheinungen wie bei den Entladungen der Influenzmaschine, nur treten sie hier viel gleichmäßiger und energischer auf.

Zu hygienischen Zwecken werden viel kleinere Apparate verwendet, und deren Wirkung kann man in der Weise passend regulieren, dass man in die Höhlung der Primärspule eine entsprechende Anzahl von Eisendrähten gibt.

Starkstromtechnik.

Zu den wichtigsten Anwendungen der Induction gehört die Construction der Dynamomaschine, mittels welcher man sowohl die mechanische Energie unmittelbar in elektrische, wie auch letztere in erstere umwandeln kann. Die ersten Maschinen, die in dieser Absicht construiert wurden, sind die magnet-elektrische Maschine von Pixii (1832), bei der ein beweglichar Stahlmagnet mit seinen Polen den Eisenkern einer Inductionsspule abwechselnd bald nordmagnetisch, bald südmagnetisch macht, und die Maschinen von Ritchie und von Ettingshausen, bei denen die Spulen mit ihren Eisenkernen vor den Polen eines feststehenden Magneten rotieren. Wenn man die Enden des auf die Spulen gewickelten Drahtes miteinander verbindet, so erhält man einen Wechselstrom, da ja die Eisenkerne bald im einen, bald im anderen Sinne magnetisiert werden. Solche Wechselströme lassen sich offenbar in eine Reihe von gleichgerichteten Strömen verwandeln, indem man die beiden Leitungsdrähte zu einem Commutator führt und diesen bei jedem Polwechsel umstellt. Gleichwie bei der Dampfmaschine die Steuerung das Aus- und Eintreten des Dampfes in den Cylinder selbstthätig regelt, so lässt sich auch das Commutieren des Stromes mit der Rotation der Spulen automatisch verknüpfen. Auf diesem Wege erhalten wir aber zunächst nur eine Reihe von gleichgerichteten Stromstößen, deren Vereinigung zu einem continuierlichen Strom von constanter Richtung führt.

Stellen wir einen geschlossenen Eisenring mit diametral gegenüberliegenden Punkten zwischen die Pole eines Magneten, so theilt sich der von ihm ausgehende magnetische Stromkreis in zwei halbkreisförmige Theile (Fig. 225). Wenn wir diesen Eisenring um eine durch den Mittelpunkt A gehende Achse im Sinne der Pfeile drehen, so bleiben die in demselben inducierten Pole immer an der nämlichen Stelle, den Polen des inducierenden Magneten gegenüber, stehen, auch wenn sich die Eisenmassen daselbst in Bewegung befinden. Versehen wir diesen Ring mit einer spiralig fortschreitenden Drahtbewicklung, so müssen auch die in derselben auftretenden Inductionen bei der Drehung einen continuierlichen Verlauf nehmen. Pacinotti bemerkte im Jahre 1860, dass die jeweilig an den Stellen O und P befindlichen Windungen miteinander verbunden, einen continuierlichen Strom von constanter Richtung geben, wenn sich der Ring in irgend einem Sinne dreht. Gramme

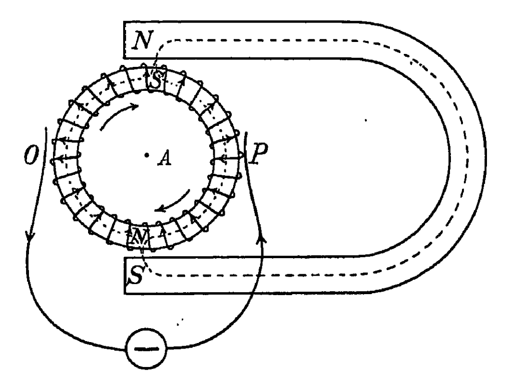


Fig. 225.

machte im Jahre 1871 ebenfalls diese Entdeckung und benützte sie sofort zur Construction einer Gleichstrommaschine; man bezeichnet daher einen so bewickelten Eisenring als einen Gramme'schen Ringanker. Derartige Maschinen sind bereits geeignet, ziemlich starke continuierliche Inductionsströme zu liefern, und werden ebenfalls magnetelektrische Maschinen genannt. Indem man damit continuierliche Ströme erzeugte und diese dann zur Erregung größerer Elektromagnete benützte, erzielte man immer stärkere Inductionswirkungen. Werner Siemens gab endlich durch die Entdeckung des sogenannten „dynamoelektrischen Principes" der Dynamomaschine im Wesentlichen ihre heutige Gestalt. Da nämlich jede größere Eisenmasse, besonders wenn sie schon einmal stark magnetisiert worden ist, immer einen Rest von remanenten Magnetismus beibehält, so reicht dieser hin, um in der Maschine zuerst ganz schwache Ströme zu erzeugen, und diese werden dazu benützt, um den Magnetismus noch mehr zu heben, und so die Induction immer stärkerer Ströme herbeizuführen. Wie sich also beim Multiplicationsverfahren durch Influenz aus sehr geringen immer größere elektrostatische Ladungen gewinnen lassen, so entwickelt auch die in Bewegung gesetzte Dynamomaschine von selbst jene Ströme, welche die letzten Reste des Magnetismus neu entfachen, und gibt schließlich so viel Strom ab, als die vorhandene Triebkraft vom Standpunkte der Erhaltung der Energie zu leisten vermag.

Den Bau einer Dynamomaschine lernen wir am besten kennen, wenn wir eine solche nach einer der gebräuchlichsten „Typen" auf Grund bestimmter Angaben entwerfen. Die zur elektrischen Beleuchtung verwendeten Glühlampen sind großentheils für eine Spannung von 100 Volt bestimmt, und daher soll die Dynamomaschine, um auch die Spannungsverluste in der Leitung decken zu können, eine etwas höhere Spannung, nämlich 120 Volt geben. Infolgedessen müssen wir dafür sorgen, dass der Stromleiter in jeder Secunde eine gewisse Anzahl von Kraftlinien durchschneidet. Diese Forderung setzt wieder einen Elektromagneten mit bestimmten Dimensionen und mit einer bestimmten Bewicklung voraus, welche die nöthige Magnetisierung herbeiführt. Geben wir dem Elektromagneten die Gestalt Fig. 226 und wählen wir als Anker einen Trommelanker, der die Gestalt eines massiven Cylinders hat, so müssen die Kraftlinien den längsten Theil ihres Weges in den Feldmagneten zurücklegen, dann an zwei Stellen eine Luftschichte passieren und schließlich noch den Anker oberhalb und unterhalb der Achse durchsetzen. In jeder um den Anker gelegten Drahtschlinge wird ein Inductionsstrom erzeugt, so oft sie die aus den Polen der Feldmagnete S und N in den Anker eindringenden Kraftlinien durchschneidet. Die so erzielte Spannung ist $e = l' v B . 10^{-8}$ Volt, wenn l' die Länge der Trommel, v die Geschwindigkeit eines Drahtes auf der Peripherie und B die Zahl der Kraftlinien bedeutet, die auf jeden cm² entfallen. Das Product dieser Factoren gibt die Spannung in absoluten Spannungseinheiten, die 10^8 mal größer ist, als die in Volt gemessene Spannung. Ist r der äußere Radius des Ankers, so ist

$$v = \frac{2 r \pi}{T} = \frac{2 r \pi n}{60}$$

wenn $n = \frac{60}{T}$ die auf die Minute bezogene Tourenzahl bedeutet. Im Ausdruck

$$l' v = \frac{2 r \pi l' n}{60}$$

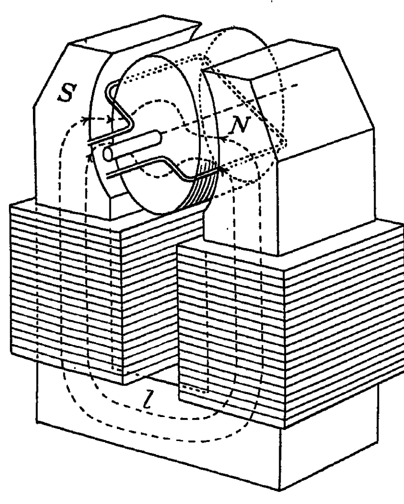


Fig. 226.

stellt also $2 r \pi l'$ die Mantelfläche des Ankers dar, auf der während einer Umdrehung $2F$ Kraftlinien durchschnitten werden, da F Kraftlinien sowohl beim Nordpol wie auch beim Südpol die Luft durchsetzen. Liegen also auf dem ganzen Umfange des Ankers z Drähte, so erhalten wir eine Spannung $e = n z \frac{2 r \pi l'}{60} B . 10^{-8} = \frac{n z}{60} . 2 F . 10^{-8}$.

Verwenden wir $z = 200$ Drähte, von denen nur die Hälfte hintereinander geschaltet werden, und ist ferner $n = 600$ die Tourenzahl pro Minute, so muss die Gleichung bestehen: $120 \text{ Volt} = \frac{600 . 100}{60} . 2 F . 10^{-8} = 2 . F . 10^{-5}$.

Um eine solche Wirkung zu erzielen, brauchen wir daher $F = 6 . 10^6$ Kraftlinien.

Damit F Kraftlinien von der durchschnittlichen Länge l in einem Eisenringe mit dem Querschnitte Q entstehen, muss bei der Permeabilität μ der benützten Eisenqualität die Gleichung bestehen: $0{\cdot}4 \pi i n = \frac{F l}{Q \mu}$.

Im vorliegenden Falle gehen aber die Kraftlinien nicht durch einen geschlossenen Eisenring, sondern sie müssen an zwei Stellen auch durch die Luft und durch den Anker hindurchgehen. Nehmen wir für die Feldmagnete Eisen von der Permeabilität $\mu = 2000$, so erhält bei einem Querschnitte $Q = 1600 \text{ cm}^2$ und einer Länge des Kraftlinienweges $l = 140$ cm der Ausdruck $\frac{l}{Q \mu}$ den Wert $\frac{140}{1600 . 2000} = \frac{14}{320000}$.

Für die beiden Luftschichten ist $\mu = 1$, die Dicke einer derselben sei 2 cm, die von beiden zusammen 4 cm, und die Polflächen betragen 2000 cm^2, also ist der analoge Ausdruck für das magnetische Feld in der Luft $\frac{4}{2000 . 1} = \frac{2}{1000}$; im Anker sei $\mu = 1000$, der Querschnitt etwa 800 cm^2 und die Länge des Kraftlinienweges 30 cm; daher ist $\frac{l}{Q \mu} = \frac{30}{800 . 1000} = \frac{3}{80000}$.

Die magnetomotorische Kraft zur Erzeugung der $F = 6 . 10^6$ Kraftlinien muss also für den ganzen Kraftlinienstrom

$$0{\cdot}4 . \pi i n = 6 . 10^6 \left(\frac{14}{320000} + \frac{2}{1000} + \frac{30}{80000} \right) = 18{\cdot}75 \, (14 + 640 + 12).$$

Aus dieser Formel ergibt sich, dass jener Antheil magnetomotorischer Kraft, welcher die Kraftlinien durch die relativ dünne Luftschichte hindurchzutreiben hat, weitaus der größte ist; er entspricht der Zahl 640 gegenüber 14 Einheiten für die Feldmagnete und 12 für den Anker. Das Product „$i n$" muss also in runder Zahl 10000 betragen; man bezeichnet es als die Zahl der „Ampèrewindungen". Wir können die erforderliche Magnetisierung ebenso gut dadurch erreichen, dass wir einen Strom von 1 Ampère in 10000 Windungen um die Feldmagnete herumfließen lassen, oder auch einen Strom von 100 Ampère in 100 Windungen. Auch ein Strom von 1000 Ampère in 10 Windungen würde dieselbe Wirkung haben. Die Kenntnis der nöthigen Ampèrewindungszahl braucht man, um die Bewicklung der Feldmagnete zu bestimmen, und sie ist für den Bau der Dynamomaschine so wichtig, wie die Kenntnis des in Atmosphären gemessenen Druckes im Kessel für eine Dampfmaschine.

Der weitere Ausbau der Dynamomaschine hängt davon ab, ob dieselbe eine Hauptstrom-, eine Nebenschluss- oder endlich eine Compoundmaschine werden soll.

Die Hauptstrommaschine. Die Art und Weise, wie die auf dem Anker angebrachten Leiter miteinander verbunden werden, damit sich alle Inductionsströme in zwei Gruppen addieren, ist bei einzelnen Constructionen verschieden. Der Strom wird im Allgemeinen vom Collector an zwei einander diametral gegenüberliegenden Stellen durch schleifende Kupferbürsten abgenommen. Die Bögen $B_1 C B_2$ und $B_1 D B_2$

(Fig. 227) stellen beide Gruppen hintereinander geschalteter Ankerwindungen dar, in welchen der Strom im gleichen Sinne induciert wird. Von der positiven Bürste B_1 fließt bei der Hauptstrommaschine der ganze Strom in die „Bewicklung“ der Feldmagnete und nimmt von hier seinen Weg in die Nutzleitung. Nachdem dann der Strom die eingeschalteten Lampen passiert hat, kehrt er zur negativen Bürste der Maschine zurück. Von der Stärke der Stromabnahme hängt es aber ab, in wie vielen Windungen der Strom um die Feldmagnete herumfließen muss, damit die Feldmagnete hinreichend erregt werden. Soll z. B. die Maschine 50 Ampère Strom geben, so ist hiezu, abgesehen von den Verlusten durch Reibung u. dgl., ein Effect von 120 . 50 = 6000 „Voltampère“ oder Watt nöthig und wir müssen daher einen Motor von mindestens 6000 Watt = 6000 : 736 = 8 Pferdekräften in Anwendung bringen. Bei 50 Ampère Stromstärke sind also 10000 : 50 = 200 Windungen zur Bewicklung der Feldmagnete nöthig. Diese sogenannte „Serienschaltung“ hat die Eigenschaft, dass die Spannung bei gesteigerter Stromstärke zunimmt, weil dadurch auch die Magnetisierung wächst; andererseits besitzt sie aber auch den Nachtheil, dass nach einer plötzlichen Zunahme des Widerstandes in der Nutzleitung, der Strom und damit auch die Stärke des magnetischen Feldes so zurückgeht, dass bei constanter Tourenzahl auch die Spannung abnimmt.

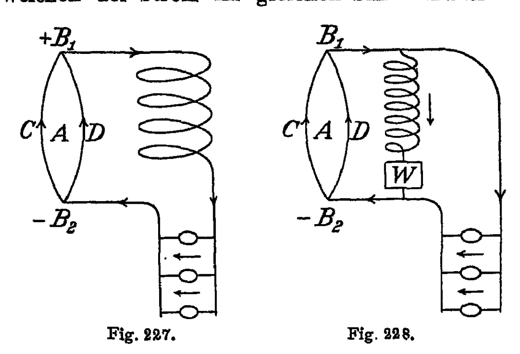


Fig. 227. Fig. 228.

Bei der Nebenschlussmaschine (Fig. 228) geht ein Theil des Stromes in die Bewicklung der Feldmagnete, der andere Theil fließt in die Nutzleitung und kehrt dann von beiden nach der negativen Bürste zurück. Während also bei der früher beschriebenen Serienmaschine Anker, Feldbewicklung und Nutzleitung hintereinander oder „in Serie“ geschaltet werden, sind jetzt alle drei Stromwege nebeneinander geschaltet und befinden sich somit im „Nebenschluss“. Bei constanter Tourenzahl gibt diese Maschine immer dieselbe Spannung, weil der Strom, der zur Erregung des Feldes verwendet wird, seine Stärke nicht ändert, solange der Widerstand der Bewicklung gleich groß bleibt. Der in den Nebenschluss eingeschaltete Widerstand W gestattet die Stromstärke in demselben und damit auch die Feldstärke und Spannung genau zu regulieren. Vom Stromconsum in der Nutzleitung ist diese Maschine nahezu unabhängig. Da der Erregerstrom in diesem Falle nur einen kleinen Theil des Nutzstromes ausmacht, so muss er in einer desto größeren Anzahl von Windungen durch die Bewicklung der Feldmagnete fließen, um dieselbe magnetisierende Wirkung zu erzielen, wie der ganze Hauptstrom in der Serienmaschine. Der Vorzug der Hauptstrommaschine, dass sie bei stärkerem Strombedarf von selbst die Spannung etwas erhöht, kann man mit den Vorzügen der Nebenschlussmaschine vereinigen, indem man auch den Hauptstrom in einigen Windungen um die Feldmagnete fließen lässt, und so erhält man die Maschinen mit gemischter Bewicklung oder die Compoundmaschine. Da übrigens die Gleichmäßigkeit der Spannung für die Praxis viel wertvoller ist und die Nebenschlussmaschine sich außerdem sehr gut regulieren lässt so beherrscht diese fast ausschließlich das Gebiet der Gleichstromgeneratoren

Die **Wechselstromgeneratoren** haben naturgemäß einen viel einfacheren Bau, da Verstärkungen und Schwächungen des magnetischen Feldes oder die Veränderungen seiner Polarität Ströme von entgegengesetzter Richtung inducieren. Die maximale Spannung wird nach denselben Grundsätzen berechnet, wie bei der Gleichstrommaschine, nämlich durch Herstellung eines magnetischen Stromkreises mit einer bestimmten Anzahl von Kraftlinien die wieder durch eine bestimmte Zahl von Leiterstücken durchschnitten werden. Der Magnetismus der Feldmagnete wird durch den Strom einer Gleichstrommaschine erregt, die unabhängig von der Wechselstrommaschine in Bewegung gesetzt wird. Ein großer Vorzug der Wechselstrommaschine ist der, dass bei ihr der commutierende Collector entfällt und infolgedessen

viel höhere Spannungen und dafür schwächere Ströme in Anwendung kommen können. Bei längeren Leitungen ist damit ein großes Ersparnis an Leitungskosten verbunden, denn der Querschnitt der Leitungsdrähte kann dann viel geringer bemessen werden. Durch Anwendung von Transformatoren lässt sich schließlich die Spannung in der denkbar einfachsten Weise beliebig erhöhen oder herabsetzen. Allerdings lässt sich der Wechselstrom nicht zu elektrolytischen Wirkungen benützen.

Die Elektromotoren. Dass die Energie elektrischer Ströme zu mechanischen Arbeitsleistungen herangezogen werden kann, das beweist principiell schon die gegenseitige Anziehung und Abstoßung paralleler Ströme, welche bereits Ampère entdeckt hat.

Der technisch vollendeten Construction der Elektromotoren geht aber eine unabsehbare Reihe von Versuchen voraus, deren Misserfolg hauptsächlich dem Umstande zuzuschreiben ist, dass man, wie bei den Dampfmaschinen, auf die Herstellung einer oscillatorischen Bewegung ausgieng, während die rotierende Form der Arbeitsleistung schon aus constructiven Gründen viel zweckmäßiger ist.

Als inzwischen die Construction der „Dynamomaschine" eine gewisse Vollendung erreicht hatte, erwies sich ihr Name auch in dem Sinne als zutreffend, dass damit zugleich die beste elektrische Kraftmaschine construiert war. Leitet man einen Strom in eine Dynamomaschine, so ruft er in derselben sofort eine kräftige Rotation hervor. Dabei bewährt sich die als Generator weniger brauchbare Hauptstrommaschine desto besser als Motor. Der in die Feldbewicklung dringende Strom erzeugt ein starkes magnetisches Feld; in diesem suchen sich die vom gleichen Strome durchflossenen Windungen auf der Mantelfläche des Ankers nach dem Lenz'schen Gesetze so zu bewegen, dass sie einen Strom von entgegengesetzter Richtung hervorrufen. Die Kraft, mit der sich der Anker im Felde dreht, ist offenbar um so größer, je intensiver das Feld und je stärker der Strom in den Windungen des Ankers ist. Diese Kraft erreicht ihr Maximum, wenn wir den Anker festhalten; sobald er sich nämlich zu bewegen beginnt, erzeugt er bereits einen Gegenstrom, der den eindringenden Strom schwächt und damit auch die Intensität des magnetischen Feldes herabdrückt. Ist der Anker nicht belastet, dass nur die minimale Arbeit der Reibung zu überwinden ist, so nimmt er bald eine abnorm hohe Geschwindigkeit an, „er geht durch". Zugleich nimmt die Stromstärke wegen der Zunahme des Gegenstromes immer mehr ab, und damit auch die Spannung an den Klemmen des Motors. Der Grenzzustand wäre der, dass die Zuleitungsdrähte nahezu stromlos werden, wenn der Motor infolge seiner hohen Geschwindigkeit dieselbe elektromotorische Kraft entwickelt wie der Generator.

Wollten wir den „leerlaufenden" Motor zu einer Arbeitsleistung heranziehen, so würde er in seiner Tourenzahl sofort stark zurückgehen. Der stillstehende Motor entwickelt dagegen die größte Kraft, aber er „arbeitet" nicht, weil er dabei den vorhandenen Widerstand nicht längs einer gewissen Strecke überwindet; der „durchgehende" Motor legt in unzähligen Touren einen langen Weg zurück, aber ihm fehlt die Kraft; auch seine Arbeit ist daher gering. In praktischen Fällen ist man in der Regel nicht in der Lage, gerade jenes Maß von Geschwindigkeit zu wählen, für welches die Arbeit ihren größten Wert annehmen würde. Man muss daher einfach einen solchen Motor wählen, der bei der günstigsten Geschwindigkeit durchschnittlich die-

jenige Stromstärke braucht, welche bei der vorhandenen Spannung gerad zur Überwindung der Arbeitsleistung hinreicht.

Die eben angeführten Eigenschaften der Hauptstrommaschine lasse dieselbe besonders geeignet erscheinen, um sie als Motor zum Antriebe eine Wagens zu verwenden. Wenn nämlich der Wagen stillsteht, so ist ein viel größere Kraft nöthig, um ihn in Bewegung zu versetzen, als um bein rollenden Wagen die Bewegung aufrecht zu erhalten; dementsprechend nimm auch der ruhende Motor viel mehr Strom auf und treibt mit desto größere Kraft zur Bewegung an; sobald aber der Wagen in Bewegung geräth, ent wickelt sich immer mehr die elektromotorische Gegenkraft, und daher nimm er von selbst um so weniger Strom auf, je schneller er geht. Der Gang der Gleichstrommotoren ist im Vergleiche zu Dampf- und Gasmotoren vie weicher und ruhiger und lässt sich bezüglich der Geschwindigkeit und Kraft durch Veränderung eines Vorschaltwiderstandes innerhalb weiter Grenze gut regulieren.

Wenn wir einen Feldmagnet durch einen Wechselstrom erregen, so ändert jede Pol fortwährend seinen Magnetismus, so oft die Stromrichtung eine andere wird. De im Anker A (Fig. 229) vom Südpol S inducierte Nordpol N werde in der Stellung bei B kräftig angezogen und, nachdem der Anker in der gezeichneten Lage eine gewisse Geschwindigkeit erreicht hat, höre der Magnetismus ganz auf. Hat der Anker eine gewisse Geschwindigkeit erreicht, so kann er infolge der kinetischen Trägheit in das An

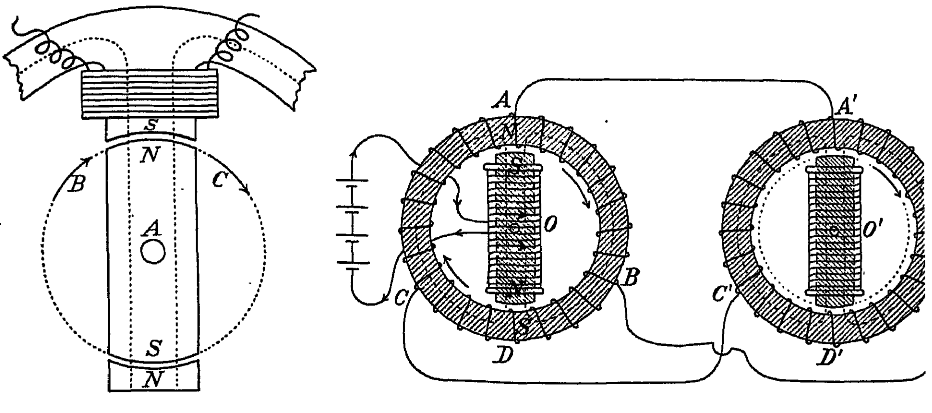


Fig. 229. Fig. 230.

ziehungsgebiet eines neuen Poles übertreten. Auf diese Weise wird der Anker fortwährend im Sinne der Pfeile gedreht. Der Gang eines solchen Motors setzt aber voraus. dass der Anker A genau in derselben Zeit von einem Pol der Feldmagnete zum anderen gelangt, in welcher auch der Strom seine Richtung wechselt. Man bezeichnet daher solche Motoren als synchrone Motoren. Bei denselben ist man nicht in der Lage, durch Verstärkung des Stromes die Geschwindigkeit zu erhöhen, wie es beim Gleichstrommotor der Fall war. Dagegen hat dieser Motor wieder die gute Eigenschaft. dass er immer mit derselben Tourenzahl läuft, so lange überhaupt seine Kraft hinreicht, die Hindernisse zu überwinden. Wenn aber der Anker nicht zur rechten Zeit angezogen und wieder losgelassen wird, so kann ein solcher Motor auch plötzlich stehen bleiben. Aber auch diese Schwierigkeit der Wechselstrommotoren hat die Technik überwunden. Zwei Eisenringe ABC und $A'B'C'$ seien mit einer in sich geschlossenen Bewicklung versehen und drei gleichweit voneinander abstehende Punkte werden, wie es Fig. 230 zeigt, durch Leitungsdrähte miteinander verbunden. Um den Mittelpunkt 0 des stromgebenden Generatorenringes, drehe sich von einer äußeren Kraft getrieben und durch eine Gleichstrommaschine magnetisiert, ein Elektro-

magnet und induciere in der gezeichneten Stellung bei A gerade einen Nordpol. Dadurch werden in den Abschnitten AB und AC Ströme von entgegengesetzter Richtung induciert, sodass je nach der Richtung der Wicklungen der Strom von beiden nach A hin oder von A weg fließt; im angeschlossenen Leiter AA' entsteht also ein Wechselstrom, da der Stelle A bald ein Südpol, bald ein Nordpol gegenübersteht. Auch in den Bewicklungen $A'B'$ und $A'C'$ wird daher der Strom nach entgegengesetzten Richtungen fließen, und bei A' der eine und bei D' der entgegengesetzte Magnetpol auftreten Welcher Magnetpol bei A' auftritt, hängt nur von der Wicklungsrichtung des Drahtes ab und ist für die Wirkungsweise ganz gleichgiltig. Durch die Leitungen BB' und CC' fließt der von A' kommende Strom zurück; die Inductionen zwischen CD und BD einerseits und zwischen $C'D'$ und $B'D'$ andererseits heben sich gegenseitig auf. Mit dem Fortschreiten des Nordpoles im ersten Ringe wird sich ein entsprechender Magnetpol von A' über B' nach C' bewegen, und zugleich wird sich der um eine Achse durch O' drehbare Anker im zweiten Ringe im gleichen Sinne drehen, und zwar mit derselben Tourenzahl. Sollte allenfalls dieser Anker bei zu starker Belastung aus seiner Stellung im Felde verdrängt werden, so nimmt ihn der nächste Pol sofort wieder mit und erhält damit die drehende Bewegung aufrecht. Da also die Drehung derartiger Motoren durch die gleichmäßige Drehung des magnetischen Feldes hervorgerufen wird, so bezeichnet man sie treffend als Drehfeldmotoren oder, da in den drei Leitungsdrähten die Phasen des Wechselstromes überall um gleich viel verschoben sind, so spricht man auch von einem Mehrphasenstrom. Man erzielt sogar eine kräftige drehende Wirkung, wenn der Anker aus einer kreisförmigen Scheibe aus weichem Eisen besteht, da dieselbe an jeder Stelle einen Pol annehmen kann. Noch kräftiger wirkt ein solcher Drehfeldmotor, wenn man als Anker eine eiserne Trommel verwendet, die in sich geschlossene Windungen trägt, weil die Inductionsströme den Magnetismus wesentlich steigern. Solche Drehfeldmotoren setzen sich, von jeder Ankerstellung ausgehend, in Bewegung, und eine Verschiebung des Ankers im magnetischen Felde bringt keine Ungleichmäßigkeiten im Gange hervor, weil derselbe nach allen Richtungen symmetrisch gebaut ist. Sie können überdies auch mit einer anderen Tourenzahl laufen als der Generator und heißen daher „asynchrone Wechselstrommotoren"; sie wurden von Ferraris (1887) und Dolivo-Dobrowolsky (1890) erfunden.

Unter Kraftübertragung versteht man jede Vorrichtung, welche dazu dient, die an irgend einem Orte vorhandene Bewegungsenergie in eine leicht übertragbare Energieform umzusetzen und dieselbe dann an einer anderen Stelle wieder in mechanische Arbeit zu verwandeln. Dies geschieht z. B., wenn bei sehr geringen Distanzen zwei Achsen durch Zahnräder miteinander verbunden werden; bei etwas größeren Entfernungen verwendet man vielfach Riemen und Drahtseile, und bei kilometerlangen Strecken lässt sich wohl nur die elektrische Kraftübertragung ohne allzugroße Verluste anwenden, indem man an der Kraftquelle einen Generator aufstellt und den erzeugten Strom zum Antriebe eines Motors verwendet. Der Wechselstrom ist bei sehr großen Distanzen darum vortheilhafter, weil man durch das Hinauftransformieren auf sehr hohe Spannung in den Leitungen geringe Stromstärke erhält und daher auch viel dünnere Leitungsdrähte verwenden kann.

Wirbelströme. Wenn wir einem stromdurchflossenen Leiter SS (Fig. 231) ein größeres massives Stück Kupfer nähern, so wird an der dem Leiter benachbarten Seite ein Strom von entgegengesetzter Richtung induciert, der aber ganz im Inneren des Metallstückes verläuft. Die Intensität eines solchen Stromes ist desto größer, je kleiner in einem solchen Stromkreise der Widerstand ist; solche Ströme werden vollständig in Wärme umgesetzt und consumieren daher große Energiemengen. Dies zeigt sich besonders beim Pendelversuche von Waltenhofen (Fig. 232), wo die ganze lebendige Kraft eines aus größerer Höhe herabstürzenden Kupferblockes durch die im magnetischen Felde entstandenen Inductionsströme in Wärme umgesetzt wird und daher das Pendel sofort zur Ruhe kommt, wie wenn man es mit der Hand aufgehalten hätte. Eine ähnliche Wirkung stellt sich ein, wenn man über einer massiven horizontalen Kupferscheibe K (Fig. 233) auf einer feststehenden Glasscheibe G eine Declinationsnadel ns aufstellt und dann die Kupferscheibe in Rotation versetzt. Die Nadel wird bald in die Rotation der Scheibe hineingezogen, da sie stillstehend in derselben fortwährend Ströme inducieren müsste, die mehr Energie absorbieren würden, als die Drehung der Nadel

auf der Spitze in Anspruch nimmt. Diese Wirkung der sogenannten Wirbel- oder Foucaultströme, schrieb Arago, der sie im Jahre 1825 zuerst bemerkte, einer neuen Art von Magnetismus, nämlich dem „Rotationsmagnetismus“ zu. Die Wirkung dieser Ströme wäre insbesondere sehr störend, wenn man den Anker der Gleichstrommaschinen, die Eisenringe der Transformatoren und jene Theile der Wechselstrommaschinen, in welchen die Magnetisierungsrichtung fortwährend wechselt, aus massiven Eisenstücken herstellen würde. Man setzt sie daher aus Eisenblechen zusammen, die entweder durch Papierzwischenlagen oder durch einen schlecht leitenden Anstrich voneinander getrennt sind. Deshalb mussten wir auch bei der Berechnung der Gleich-

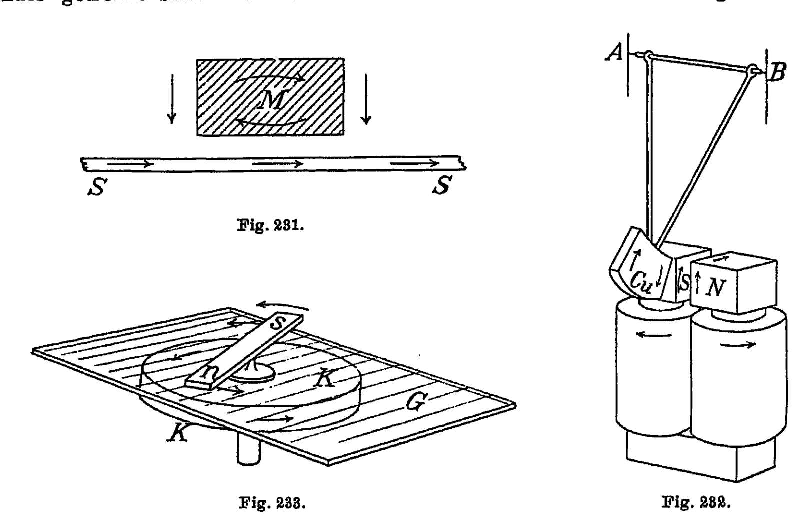


Fig. 231.

Fig. 233.

Fig. 232.

strommaschine für den Anker eine geringere Permeabilität annehmen. Die Magnetnadel im Galvanometer wird von einem massiven Kupfergehäuse umgeben, da die in demselben erzeugten Wirbelströme sehr bald die lebendige Kraft der schwingenden Magnetnadel aufzehren und daher dieselbe oft schon nach einer einzigen Schwingung zur Ruhe bringen, ohne ihre freie Beweglichkeit zu verhindern. Solche Galvanometer heißen, da die periodischen Schwingungen der Nadel rasch gedämpft werden, „aperiodisch“.

Hysteresis nennt man das Zurückbleiben der Magnetisierung des Eisens hinter den Veränderungen in der Intensität des magnetischen Feldes. Diese Erscheinung hängt zusammen mit der zur Magnetisierung nöthigen Arbeit und macht sich besonders bemerkbar, wenn z. B. größere Eisenmassen in jeder Secunde 50—100 mal ihre Magnetisierungsrichtung wechseln müssen, wie es bei Wechselstrommaschinen oft vorkommt. Auch die Überwindung der Hysteresis bedingt einen namhaften Verlust an Energie beim Umsatze von mechanischer in elektrische Energie und umgekehrt.

Messapparate für starke Ströme. Die Spannungen und Stromstärken werden in der Praxis nicht mit Galvanometer und Tangentenbussole gemessen, wie in der Schwachstromtechnik, sondern mit Apparaten, die eine sofortige Ablesung gestatten. Bei sehr starken Strömen stellt man mit wenigen Windungen, durch welche der ganze Strom fließt, ein magnetisches Feld her, das einen sehr leicht beweglichen Eisenkern in dieses Feld hineinzuziehen sucht. Die Kraft, mit der dies geschieht, kann dadurch gemessen werden, dass man beobachtet, wie weit dabei eine elastische Feder auseinander gezogen wird, oder indem man, wie bei der Zeigerwage, das Gewicht des verschobenen Zeigers als Gegengewicht benützt. Diese Bewegungen werden dann in verschiedener Weise auf einen Zeiger übertragen, der auf einer

empyrisch geaichten Scala die herrschende Stromstärke angibt. Alle derartig eingerichteten Strommessvorrichtungen nennt man „Ampèremeter". Auch Spannungsdifferenzen lassen sich auf diesem Wege messen; nur wird dabei das magnetische Feld nicht von wenigen Windungen eines starken Stromleiters hergestellt, sondern durch sehr viele Windungen eines dünnen Drahtes, der dem Durchgange des Stromes einen sehr großen Widerstand entgegensetzt. Die beiden Klemmen dieser sogenannten „Voltmeter" werden stets mit den beiden Stromleitern in Verbindung gesetzt, zwischen welchen die Spannung gemessen werden soll. Das Product aus Stromstärke und Spannung gibt beim Gleichstrome die in Watt ausgedrückte Stromarbeit an. Die sogenannten „Hitzdraht-Ampèremeter und Voltmeter" beruhen auf der Verlängerung eines Leitungsdrahtes durch die Joule'sche Stromwärme.

Die Stromstärke kann auch mit Hilfe des „Elektrodynamometers" gemessen werden, das auf der gegenseitigen Anziehung gleichgerichteter Ströme beruht und daher auch zur Messung von Wechselströmen geeignet ist; zwei gleichzeitig sich ändernde Wechselströme ziehen sich nämlich gerade so an, wie ein Gleichstrom den anderen. Das Elektrodynamometer gibt allerdings nur einen bestimmten Mittelwert an, und die Theilpunkte der Scala . durch Aichung festgestellt.

Die elektrische Beleuchtung. Keine der zahlreichen Anwendungen, welche der elektrische Strom gestattet, hat die Elektrotechnik so gehoben, wie die elektrische Beleuchtung, besonders bei ihrer Ausdehnung auf größere Stadtgebiete. Eine Vorbedingung dieses Aufschwunges war die Erfindung zweckentsprechender Beleuchtungskörper, die ohne allzugroße Kosten bei möglichst geringem Stromverbrauche eine große Leuchtkraft entwickeln. Diesen Anforderungen entspricht in befriedigender Weise die vom bekannten amerikanischen Ingenieur und Physiker Thomas Awa Edison und von Swan im Jahre 1879 erfundene Glühlampe. (Fig. 234.) In einer luftleeren Glasbirne ist, mit den eingeschmolzenen Drähten verbunden, ein dünner steifer Kohlenfaden befestigt, der im glühenden Zustande einen Widerstand von etwa 200—300 Ohm besitzt. Verbindet man die aus der Lampe kommenden Drähte mit zwei Stromleitern, zwischen denen eine Spannungsdifferenz von 100 Volt herrscht, so fließt durch den Kohlenfaden ein Strom von etwa $^1/_2$—$^1/_3$ Ampère und erwärmt dadurch denselben derart, dass er weißglühend wird und dabei eine Leuchtkraft von circa 16 Normalkerzen entwickelt. Der Mangel an Luft verhindert dabei die sofortige Verbrennung. Es werden aber auch Lampen hergestellt, die bei einer anderen Spannung die gleiche oder bei derselben Spannung eine größere oder geringere Leuchtkraft besitzen, z. B. von 50 oder 10 Kerzen. Die Glühlampe brennt fast mit derselben Leuchtkraft, ob sie mit Gleichstrom oder mit Wechselstrom gespeist wird. Die Brenndauer einer Glühlampe beläuft sich durchschnittlich auf 800—1000 Stunden.

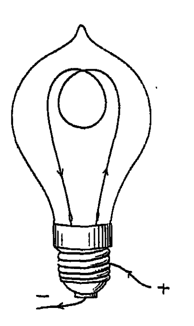


Fig. 234.

Einen wesentlich verschiedenen Charakter zeigt das elektrische Bogenlicht. Schon im Jahre 1810 bemerkte der englische Physiker Davy, dass zwischen zwei in den Stromkreis einer starken galvanischen Kette eingeschalteten Kohlenstücken beim Auseinanderziehen zuerst ein außerordentlich hell leuchtender, andauernder Funken auftritt, der die beiden

Kohlen bogenförmig miteinander verbindet. Diese Erscheinung wird deshalb als „Davy'scher Lichtbogen“ bezeichnet (Fig. 235). Dieser Lichtbogen ist zugleich die stärkste künstliche Licht- und Wärmequelle. Bei den sogenannten „Bogenlampen“, wie sie gewöhnlich zur Beleuchtung größerer Plätze verwendet werden, herrscht zwischen den Kohlen eine Spannungsdifferenz von 45—50 Volt, und durch den Lichtbogen fließt ein Strom von 10—20 Ampère. Die günstigsten Beleuchtungserfolge erzielt man aber nur bei einer gewissen Entfernung der beiden Kohlenspitzen, die sich beim Abbrennen derselben allmählich vergrößert; zugleich wächst auch der Widerstand, und mit der Stromstärke nimmt dann auch die Leuchtkraft immer mehr ab. Man hat daher Lampen construiert, bei denen der Strom selbst dafür sorgt, dass die Kohlen sehr langsam einander näher geschoben werden und der Lichtbogen immer dieselbe Länge beibehält. Der Lichtbogen besteht aus vielen kleinen Kohlentheilchen, die sich im weißglühenden Zustande befinden und größtentheils vom positiven Pole losgerissen werden; daher höhlt sich dieser kraterförmig aus, und das Kohlenstück wird dabei etwa doppelt so schnell verzehrt, wie das negative. Nebst den losgerissenen Theilchen besitzt der Krater die größte Leuchtkraft; man bringt deshalb die positive Kohle immer oberhalb an, damit das dem Krater entströmende Licht nach unten fällt. Die Leuchtkraft solcher Lampen schwankt zwischen 700—1000 Kerzen, die aber durch die Milchglasumhüllung etwa um $^1/_3$ vermindert wird. Bei der Anwendung von Wechselstrom verhalten sich beide Kohlenstücke ganz gleichartig, aber das Licht ist „intermittierend“, d. h. die Lichtstärkung nimmt so oftmal zu und ab, als der Strom seine Richtung wechselt. Die Glühlampe gibt dagegen auch bei Wechselstrom constantes Licht.

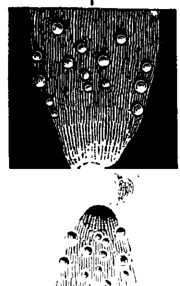




Fig. 235.

Der Davy'sche Lichtbogen wird wegen seiner hohen Temperatur von etwa 3500° C auch zu chemischen Reactionen, wie z. B. zur Herstellung des Calciumcarbides verwendet (elektrischer Herd). Eisenstücke lassen sich mit Hilfe des Davy'schen Lichtbogens ohne Löthmittel wie Wachs zu einem Stücke zusammenschmelzen.

———o———

Wellenlehre.

Von einer Wellenbewegung kann man erst dann sprechen, wenn sehr viele Massentheilchen zugleich Schwingungen ausführen, wie es z. B. bei der dem Ufer sich nähernden Brandungswelle oder bei einem Saatfelde der Fall ist, über welches der Wind streicht, wenn also Tausende von Halmen gleichzeitig in schwingende Bewegungen versetzt werden.

Den Verlauf der harmonischen Bewegung charakterisieren in erster Linie die Schwingungsdauer oder ihr reciproker Wert, die Schwingungszahl, und die Stärke oder Intensität der Schwingung, die um so größer ist, je mehr sich die schwingenden Massen von der Ruhelage entfernen; der erstere Wert ist von der Stärke der Schwingung innerhalb weiter Grenzen unabhängig. Bei der harmonischen Bewegung haben wir die Schwingungen eines Körpers betrachtet und konnten daher dieselbe durch die Schwingungen seines Schwerpunktes ersetzen. Bei der Wellenbewegung müssen wir jedoch zu ermitteln suchen, in welcher Weise die Schwingungen einer Masse auf andere Massen übergehen, die mit ihr nicht fest, sondern durch veränderliche Kräfte verbunden sind.

An einem unbeweglichen Balken AB (Fig. 236) sei der Gummischlauch $ACDB$ befestiget, und an diesem hängen zwei Pendel von gleicher Länge. Wenn wir das eine in Schwingungen versetzen, die zur Zeichenebene senkrecht stehen, so zieht es bald auch das zweite in die Bewegung hinein, während unterdessen das erstere zur Ruhe kommt; nach einer gewissen Zeit gehen die Schwingungen wieder auf das erstere über, und so setzt sich dieses Spiel fort, bis die Schwingungen erlöschen. Legen wir ein mehrere Meter langes Seil ganz schlaff, aber in gerader Linie auf den Boden, so können wir durch eine einmalige rasche Hebung des freien Endes eine Wellenbewegung hervorrufen, die sich allmählich das ganze Seil entlang fortsetzt. Es muss also jeder Theil die schwingende Bewegung nahezu unverändert auf die Nachbartheile übertragen haben. Die meisten Erscheinungen der Akustik und Optik beruhen auf einer derartigen Übertragung von Wellenbewegungen.

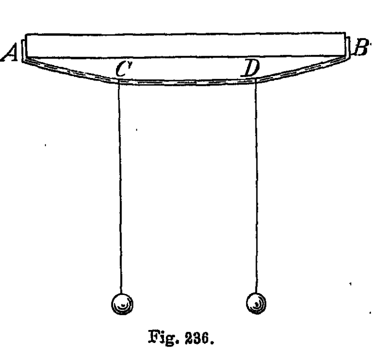


Fig. 236.

Die Wellenlinie. Um den Zusammenhang zwischen den Schwingungen kennen zu lernen, die mehrere miteinander verbundene Massen gleichzeitig ausführen, wollen wir annehmen, dass dieselben wie die Punkte einer Geraden aneinandergereiht seien. Wir können uns ferner vorstellen, dass jede dieser Massen um ihre Ruhelage Schwingungen ausführt, die entweder in der Richtung der Geraden oder in einer auf ihr senkrechten Richtung er-

folgen. In ersterem Falle spricht man von longitudinalen, in letzterem Falle von transversalen Wellenbewegungen. Schwingungen der ersten Art stellen sich ein, wenn wir ein Gewicht an einer Spiralfeder aufhängen und ihm in verticaler Richtung einen Stoß geben. Transversalschwingungen entstehen dagegen, wenn sich die einzelnen Theile eines in horizontaler Richtung ausgespannten Seiles vertical auf- und niederbewegen.

In beiden Fällen lässt sich die Bewegung jedes Massentheilchens durch die Formel der harmonischen Schwingung darstellen; es ist also

die Entfernung von der Ruhelage . . . . $x = a \sin \frac{2\pi}{T} t$,

die Geschwindigkeit in dieser Richtung . . . . . $v = \frac{2\pi a}{T} . \cos \frac{2\pi}{T} t$

und die gegen den Mittelpunkt gerichtete Beschleunigung $b = -\frac{4\pi^2 a}{T^2} \sin \frac{2\pi}{T} t$.

Dabei bedeutet a die Amplitude oder Schwingungsweite, T die Schwingungsdauer und $n = \frac{1}{T}$ die Schwingungszahl. So lange die Bedingungen, von denen die Fortpflanzungsgeschwindigkeit abhängt, dieselben sind, wird die Wellenbewegung mit gleichförmiger Geschwindigkeit fortschreiten, d. h. jede Stelle, an der sich eine bestimmte Schwingungsphase einstellt, schreitet mit einer gewissen constanten Geschwindigkeit fort. Stellen die oben angeführten Formeln die Schwingungen eines Punktes P_1 dar, so erhalten wir die für den Punkt P_2, indem wir von der abgelaufenen Zeit t den Zeitraum subtrahieren, um welchen dort diese Schwingungsphase später eintrifft, und dieser Zeitraum beträgt bei der Fortpflanzungsgeschwindigkeit c für die Entfernung von y cm $\frac{y}{c}$ Secunden. Der Schwingungszustand an dieser Stelle entspricht daher den Formeln:

$$x = a \sin \frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{y}{c}\right),\ v = \frac{2\pi a}{T} \cos \frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{y}{c}\right) \text{ und } b = -\frac{4\pi^2 a}{T^2} \sin \frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{y}{c}\right).$$

Alle diese Ausdrücke nehmen wieder denselben Wert an, wenn der Ausdruck $\frac{2\pi}{T} . \frac{y}{c} = 2\pi$, also wenn $y = c\,T = \lambda$; man bezeichnet daher diese Strecke λ als eine Wellenlänge.

Bei der Wellenmaschine von Mach schwingen die Kugeln, welche den Wellenzug darstellen, mit derselben Schwingungszahl $n = \frac{1}{T}$, weil sie an gleich langen Schnüren hängen; die Fortpflanzungsgeschwindigkeit c der Welle entspricht der Geschwindigkeit, mit der man die Schiene, welche die Pendel in Bewegung setzt, aus der Maschine herauszieht.

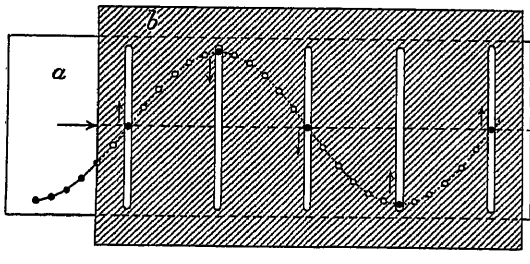


Fig. 237.

Falls die Punkte einer Geraden nacheinander senkrecht zu deren Richtung schwingen, so erhalten wir eine fortschreitende Transversalwelle. Davon kann man sich überzeugen, wenn man das Blatt a (Fig. 237) unterhalb des Papierblattes b in der Richtung des Pfeiles

wegzieht. In den herausgeschnittenen Streifen führen dann die auf der „Sinuslinie“ liegenden Punkte harmonische Transversalschwingungen aus. Verschiebt man dagegen die Curven a (Fig. 238) unter dem Papierstück b in der Richtung des Pfeiles, so ergeben die Durchschnittspunkte mit den gezeichneten Sinuslinien eine fortschreitende Longitudinalwelle, und zwar eine von links

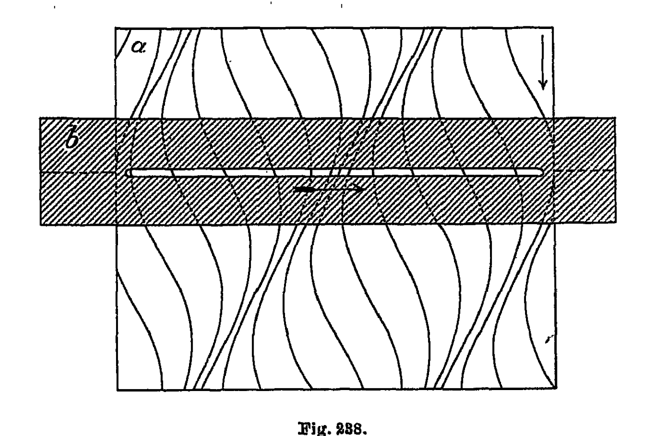


Fig. 238.

nach rechts fortschreitende, wenn man das Blatt mit den Sinuslinien von oben nach unten zieht, und eine von der entgegengesetzten Richtung, wenn man es nach oben schiebt.

Dasselbe ergibt sich durch Discussion der Formel $x = a \sin \frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{y}{c}\right)$.

Fassen wir jene Stellen ins Auge, für welche die Entfernung x von der Ruhelage denselben Wert hat, weil $t - \frac{y}{c} = t' - \frac{y'}{c}$, also $t - t' = \frac{y - y'}{c}$ und daher $c = \frac{y - y'}{t - t'}$, so sehen wir, dass sich die Punkte gleicher Phase mit der Geschwindigkeit c in der Richtung OX fortbewegen. Setzen wir dagegen $x = a \sin \frac{2\pi}{T}\left(t + \frac{y}{c}\right)$, so folgt aus $t + \frac{y}{c} = t' + \frac{y'}{c}$, dass $c = \frac{y' - y}{t - t'} = -\frac{y - y'}{t - t'}$; die Welle schreitet also im entgegengesetzten Sinne OX' fort.

Stehende Wellen. Sollen die auf derselben Geraden liegenden Punkte die Schwingungen zweier Wellenbewegungen gleichzeitig ausführen,

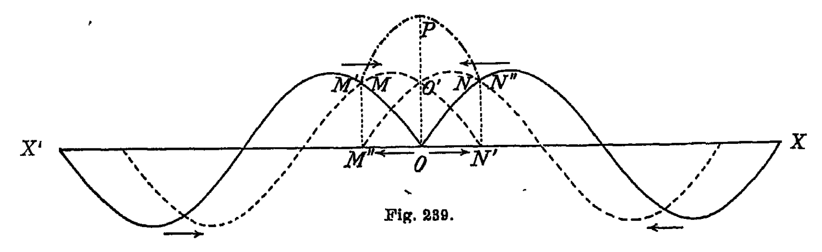


Fig. 239.

so vereinigen sich die resultierenden Bewegungen der einzelnen Punkte zu einer neuen Welle, die unter Umständen sehr verschiedene Formen annehmen

kann. Wir wollen uns nur mit den einfachsten Formen befassen. Dem Punkte O (Fig. 239) nähern sich von beiden Seiten zwei fortschreitende Wellen mit gleicher Fortpflanzungsgeschwindigkeit und gleicher Amplitude, und zwar beide zuerst mit dem Wellenberge. Der Punkt P wird sich also, beiden Wellenbewegungen folgend, nach oben bewegen und die doppelte Schwingungsweite der beiden Wellencomponenten erreichen. Wenn dann die beiden Wellenthäler zusammenstoßen, so bewegt er sich ebensoweit nach der anderen Seite und macht also Schwingungen mit derselben Schwingungsdauer, aber doppelter Amplitude. Stößt dagegen in Fig. 240 der „Wellenberg" mit

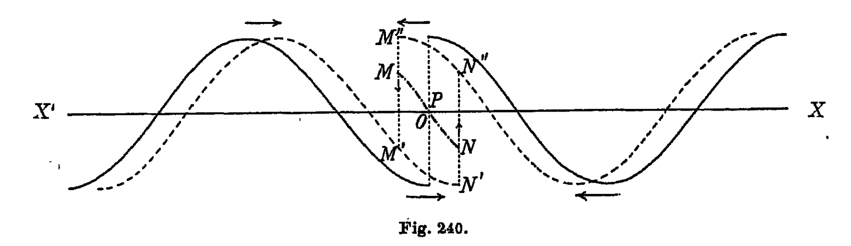


Fig. 240.

einem „Wellenthale" zusammen, so müsste der Punkt sich gleichzeitig ebensoweit nach oben wie nach unten bewegen, und diese beiden Bewegungen heben sich auf. Sie heben sich sogar immer auf, solange sich jene Wellenzüge an dieser Stelle kreuzen.

Zum gleichen Resultate gelangen wir auch mit den entsprechenden Formeln. $x_1 = a \,.\, \sin \frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{y}{c}\right)$ und $x_2 = a \,.\, \sin \frac{2\pi}{T}\left(y + \frac{y}{c}\right)$ stellen zwei solche Wellenzüge dar, die sich nach entgegengesetzter Richtung fortpflanzen; ihre Resultierende ist also

$$x = x_1 + x_2 = a \sin \frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{y}{c}\right) + a \sin \frac{2\pi}{T}\left(t + \frac{y}{c}\right) = 2\,a \sin \frac{2\pi}{T} t \cos \frac{2\pi y}{cT}.$$

An jener Stelle, wo $y = 0$ und $\cos \frac{2\pi y}{cT} = 1$ ist, werden also die Punkte nach der Formel $x = 2\,a \sin \frac{2\pi}{T} t$ harmonische Schwingungen um die Ruhelage mit der Amplitude $2\,a$ ausführen. In jenen Punkten dagegen, wo $\cos \frac{2\pi y}{cT} = \cos \frac{2\pi}{\lambda} y = 0$, also für $\frac{2\pi}{\lambda} y = \frac{\pi}{2}$, $3\,\frac{\pi}{2}$, ..., $(2\,n + 1)\,\frac{\pi}{2}$ oder für $y = \frac{\lambda}{4}$, $3\,\frac{\lambda}{4}$, ..., $(2\,n + 1)\,\frac{\lambda}{4}$, ist x immer gleich Null, und solche Punkte, die sich nie aus ihrer Ruhelage entfernen, nennt man Knotenpunkte. Zwischen den Knotenpunkten liegen die Schwingungsbäuche, in welchen alle Punkte Schwingungen mit derselben Phase, aber mit verschiedener Amplitude ausführen. Je zwei Knotenpunkte haben eine Entfernung von $2\,\frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda}{2}$, und daher entfallen auf jede Wellenlinie zwei Schwingungsbäuche.

Stoßen an einer Stelle beide Wellenzüge mit derselben Phase zusammen, so treten die Knotenpunkte bei den ungeraden Vielfachen von Viertelwellenlängen auf.

Haben jedoch die Wellen an jener Stelle, wo sie sich begegnen, die entgegengesetzte Phase, ist also

$$x_1 = a \sin \frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{y}{c}\right), x_2 = -a \sin \frac{2\pi}{T}\left(t + \frac{y}{c}\right) \text{ und}$$

$$x = x_1 + x_2 = a \sin \frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{y}{c}\right) - a \sin \frac{2\pi}{T}\left(t + \frac{y}{c}\right) =$$

$$2\, a \cos \frac{2\pi}{T}\, t \sin \frac{2\pi y}{c\,T} = 2\, a \cos \frac{2\pi}{T}\, t \sin \frac{2\pi y}{\lambda},$$

so erhalten wir Knotenpunkte für

$$\frac{2\pi y}{\lambda} = 0, \pi, 2\pi, \ldots, n\pi, \text{ also dort, wo } y = 0, \frac{\lambda}{2}, 2\frac{\lambda}{2}, \ldots, n\frac{\lambda}{2} = 2n'\frac{\lambda}{4},$$

mithin bei den geradzahligen Vielfachen von Viertelwellenlängen. Im ersten Falle (Fig. 239) befindet sich also der erste Knotenpunkt in der Entfernung $\frac{\lambda}{4}$ von 0, im zweiten Falle (Fig. 240) im Punkte 0 selbst und in jeder weiteren Entfernung von $\frac{\lambda}{2}$.

In beiden Fällen gibt es Augenblicke, in welchen alle Punkte auf der ganzen Linie sich in ihrer Ruhelage befinden, nämlich im ersteren Falle, wenn $\frac{2\pi}{T} t = 2n' \frac{\pi}{2}$, im zweiten Falle, wenn $\frac{2\pi}{T} t = (2n' + 1) \cdot \frac{\pi}{2}$. Bei trans-

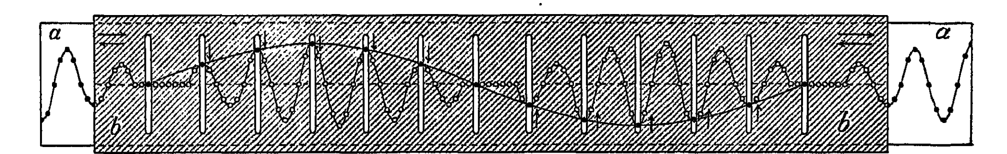


Fig. 241.

versalen Schwingungen bewegen sich also zwischen den Knotenpunkten alle Punkte gleichzeitig nach oben und gleichzeitig nach unten, wie in Fig. 241, wenn

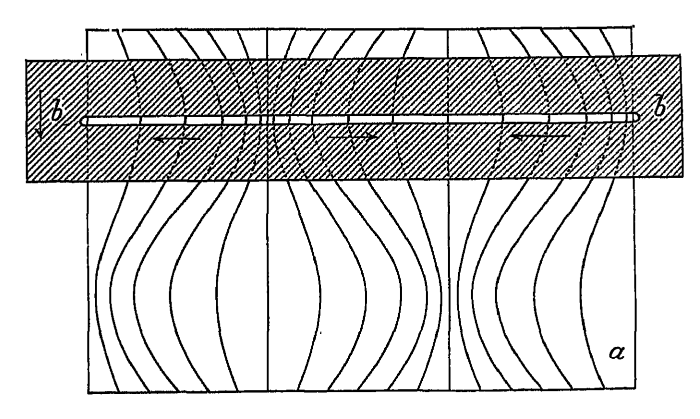


Fig. 142.

man das Blatt b über dem Blatte a in der Richtung der Pfeile hin und her zieht, und bei Longitudinalschwingungen bewegen sich alle Punkte zwischen zwei Knoten-

punkten nach rechts und zwischen den beiden benachbarten Knotenpunkten nach links, wie es die Fig. 242 zeigt, wenn man das Blatt *a* unter dem Blatte *b* auf- und niederschiebt.

Die räumliche Welle. Wir haben bisher nur von solchen Wellen gesprochen, bei welchen die schwingenden Massen die Punkte einer beweglichen Linie bilden. Ähnliche Wellenbewegungen kommen in der Natur relativ seltener vor; weitaus in den meisten Fällen geht die Verschiebung der Massen von einem kleinen Raume aus und pflanzt sich dann nach allen Richtungen hin im Raume fort. Die formelle Behandlung derartiger Wellengebilde gestaltet sich sehr einfach und anschaulich, wenn wir ihnen das Huygens-sche Princip zugrundelegen. Diesem zufolge können wir jeden Punkt, bis zu dem eine Welle vordringt, als Mittelpunkt einer neuen kugelförmigen Welle auffassen, die sich mit derselben Geschwindigkeit ausbreitet, wie die ursprüngliche.

Die in diesem Sinne behandelte Lichttheorie von Huygens: „Tractatus de lumine“ erschien im Jahre 1690 in französischer und in lateinischer Sprache, fand aber erst zu Beginn des 19. Jahrhunderts die ihr gebürende Beachtung, als der englische Physiker Thomas Young auf ihre Bedeutung hinwies und der französische Physiker Augustin Fresnel, von ihr ausgehend, die Theorie des Lichtes als Wellenform ausführlich behandelte.

Die Kugelwelle. Stellen wir uns vor, im Innern eines mit Luft gefüllten Gummiballons von 10 cm Radius erfolge eine kleine Explosion, die seinen Halbmesser in einem Hundertel einer Secunde um 1 cm vergrößert, so wird sich zuerst allerdings nur in der nächsten Umgebung eine Luftverdichtung einstellen, die sich bis zum Ende jener Zeit über eine Kugel mit dem Radius von 3·3 m ausbreitet. Die Oberfläche dieses sich immer mehr erweiternden Verdichtungsgebietes bezeichnen wir als eine Wellenfläche. Im vorliegenden Falle ist also die Wellenfläche kugelförmig, und daher nennen wir sie eine Kugelwelle. Nach der Darstellung von Huygens können wir uns die Entstehung derselben auch so vorstellen, dass von jedem einzelnen Punkte der Oberfläche des sich ausdehnenden Ballons eine solche Kugelwelle ausgieng; diese nach allen Richtungen sich durchschneidenden Kugeln haben aber eine gemeinsame Berührungskugel, welche eine neue Wellenfläche darstellt. (Fig. 243.) Auch die Punkte dieser Kugelfläche werden als Mittelpunkte neuer Kugelwellen betrachtet, deren gemeinsame Berührungsfläche wieder eine Wellenfläche bildet, und so behalten im vorliegenden Falle alle Wellenflächen die kugelförmige Gestalt bei.

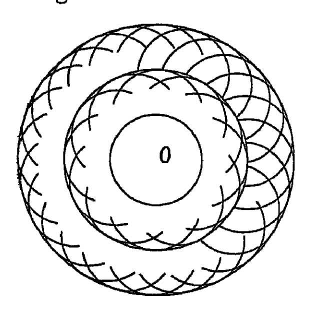


Fig. 243.

Zur Verdichtung der Luft in der nächsten Nähe des Ballons war eine gewisse Arbeit nöthig. Hat die Kugelwelle nach einiger Zeit den doppelten Halbmesser und daher die vierfache Oberfläche angenommen, so wäre zu einer gleich starken Verdichtung die vierfache Arbeit nöthig. Wenn aber bei der Ausbreitung der Welle immer dieselbe Arbeitsgröße von einer Schichte auf die andere übergeht, so wird die Verdichtung immer geringer und zwar nimmt sie proportional mit dem Quadrate des Halbmessers ab. Die Energie einer sich kugelförmig ausbreitenden Welle ist also dem Quadrate des Halbmessers verkehrt proportional.

Der Wellenstrahl (Fig. 244). AB sei der Querschnitt einer Kreisfläche, welche sich stoßweise hebt und daher oberhalb eine plattenförmige Verdichtung hervorruft. Betrachten wir auch hier die von ihren Punkten ausgehenden Kugelwellen, so werden dieselben nach einer gewissen Zeit eine gemeinsame Tangentialebene $A'B'$ haben, die wieder die Mittelpunkte neuer Kugelwellen enthält und denselben Flächeninhalt besitzt, weshalb die Intensität der Verdichtung beim Fortschreiten der Welle nicht abnimmt. Diese Wellenflächen bleiben zueinander parallel und schreiten mit derselben Geschwindigkeit fort, mit der sich überhaupt die Wellen in diesem Medium fortpflanzen. Wenn die Fläche AB in der Richtung AA' dauernd Schwingungen ausführt, so pflanzen sich dieselben als Longitudinalwellen in der Richtung AA' fort, wenn sich aber das Medium über AB in Schwingungen parallel zur Ebene AB bewegt, so pflanzen sich auch diese Bewegungen in der Richtung AA', aber als Transversalwellen fort. In beiden Fällen wollen wir das ganze in wellenförmiger Bewegung befindliche, prismatische Massengebiet als den von AB ausgehenden Wellenstrahl bezeichnen.

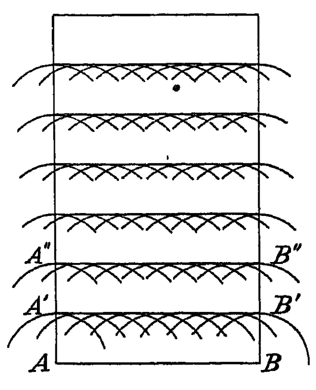


Fig. 244.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellenbewegung. Wenn wir an einer längeren Spiralfeder ein Gewicht aufhängen und dasselbe in verticaler Richtung in Schwingungen versetzen, so verschiebt sich nicht nur die Masse des Gewichtes, sondern auch die der Feder bis zum unverschiebbaren Aufhängungspunkte. Zwischen der Verlängerung, welche die Spiralfeder durch das Gewicht erhalten hat, und der Länge der unbelasteten Feder besteht aber ein gewisses Verhältnis, das nur von der Stärke des ausgeübten Zuges und von der Elasticität der Feder abhängt. Wenn wir in ähnlicher Weise am freien Ende eines längeren Stabes während einer sehr kurzen Zeit einen Zug ausüben, so pflanzt sich derselbe in dieser Zeit so weit fort, bis die dabei geleistete Arbeit dem Producte aus der hervorgebrachten Verschiebung und der überwundenen Elasticitätskraft gleichkommt. Sobald diese Arbeit geleistet wird, vermögen die Elasticitätskräfte auch die benachbarten Massen in diese Bewegung hineinzuziehen und es greift dann die zur Verschiebung der ersten Masse aufgewendete Arbeit auf immer neue Gebiete über; daher pflanzt sich auch eine in der Mitte eines langen Stabes erzwungene Verschiebung nach beiden Seiten fort.

Die bei der Dehnung eines Stabes verwendete Kraft muss gleich sein dem Producte aus der bewegten Masse und der ihr ertheilten Beschleunigung. Der Elasticitätsmodul E gibt die Kraft an, welche nöthig ist, um einen Stab von der Länge 1 cm und dem Querschnitt 1 cm² um 1 cm zu verlängern. Daher ist die Kraft, welche angewendet werden muss, um einen Stab von der Länge L cm und vom Querschnitte q cm² um l cm zu verlängern, $P = E\frac{lq}{L}$.

Diese Kraft muss auch hinreichen, um den schwingenden Massen die maximale Geschwindigkeit v zu geben, wenn sich der Stab von der Länge L um die Strecke l ausdehnt, während sich die Welle in ihm mit der Geschwindigkeit c ausbreitet. Daher besteht die Proportion $v : c = l : L$, und es ist $v = \frac{l}{L} c$. Hat in dieser Zeit T die

Masse $m = d \,.\, qcT$ die Geschwindigkeit v angenommen, wenn d die Dichte und q der Querschnitt des Stabes, also $q \,.\, L = qcT$ sein Volumen bedeutet, so war dazu die Kraft $P = m \,.\, \frac{v}{T} = dqcT \,.\, \frac{l}{L}\, c \,.\, \frac{1}{T} = E\, \frac{lq}{L}$ nöthig; es bestehen daher die Gleichungen $dc^2 = E$ und $c = \sqrt{\frac{E}{d}}$.

Für feste Körper lässt sich der Elasticitätsmodul E aus der durch ein Gewicht hervorgerufenen Verlängerung eines Drahtes ableiten, für Flüssigkeiten ergibt sich dieser Wert aus dem Verdichtungsverhältnisse, das man durch Anwendung eines gewissen Druckes erzielt. Bei Gasen muss zur Verschiebung einer Oberfläche von 1 cm lediglich der in ihnen herrschende Druck überwunden werden, also in der freien Luft der Druck der Atmosphäre. Andererseits bietet gerade diese für Gase schon von Newton im Jahre 1687 in seinem berühmten Werke „Philosophiae naturalis principia mathematica" aufgestellte Formel Gelegenheit, jene Werte noch auf einem anderen Wege zu finden, beziehungsweise zu corrigieren.

Reflexion und Brechung der Wellen. Pflanzt sich ein Wellenstrahl bis zur Begrenzungsfläche zweier Medien fort, deren Dichte und Elasticität verschieden ist, so müssen sich hier auch die Fortpflanzungsverhältnisse ändern. Es sei demnach die Fortpflanzungsgeschwindigkeit im ersten Medium $c_1 = \sqrt{\frac{E_1}{d_1}}$ und im zweiten Medium $c_2 = \sqrt{\frac{E_2}{d_2}}$.

Die von der Grenzfläche (Fig. 245) ausgehenden halbkugelförmigen Wellen werden also Halbmesser haben, deren Radien sich wie die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten in beiden Medien c_1 und c_2 (oder c_1 und c_2') verhalten. Der einfallende Wellenstrahl spaltet sich mithin in zwei Strahlen, von denen der „reflectierte Strahl" in das erstere Medium zurückkehrt, während der „gebrochene Strahl" in das neue Medium übertritt.

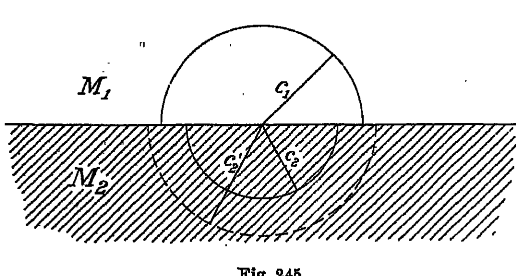


Fig. 245.

In Fig. 246 stelle AA' den Querschnitt der Wellenfläche in dem Augenblicke dar, in welchem sie bei A gerade die Grenzfläche berührt. Bis sich die Welle auch von A' nach B fortgepflanzt hat, wird die von A ausgehende Kugelwelle bereits einen Halbmesser von der Länge $A'B = AB'$ erreicht haben. Der Theil der Welle, der von R über P nach O gelangt ist, hat hier ebenfalls eine Kugelwelle hervorgerufen, deren Halbmesser inzwischen so groß geworden ist, wie $O'B = OP'$. Wie für die von A und O ausgegangenen Kugelwellen, so ist BB' auch für alle übrigen von der Grenzfläche AB ausgehenden Kugelwellen die gemeinsame Tangentialebene. Von BB' ausgehend wird sich wieder ein Wellenstrahl in der Richtung $OP'R'$ geradlinig fortpflanzen und daher mit dem Einfallslothe OY denselben Winkel α einschließen, welchen auch der einfallende Strahl RPO mit ihm bildet.

Jeder Wellenstrahl wird also an einer ebenen Grenzfläche zweier Medien so reflectiert, dass der Einfallswinkel gleich ist dem Reflexionswinkel.

Nebst der ebenen Wellenfläche BB' im ersteren Medium stellt sich noch eine zweite Wellenfläche im zweiten Medium ein, denn die von A ausgehende

Kugelwelle legt im zweiten Medium einen Weg $AB'' = \frac{c_2}{c_1} . A'B$ zurück, weil sich die in gleichen Zeiten zurückgelegten Wege wie die Geschwindigkeiten verhalten. Die von O ausgehende Kugelwelle erreicht zur gleichen Zeit nur die Größe $OP'' = \frac{c_2}{c_1} . O'B$ und besitzt mit der von A ausgehenden Kugelwelle die gemeinsame Tangentialebene BB''; von dieser neuen Wellenfläche pflanzt sich dann der gebrochene Wellenstrahl in der Richtung $P'' R''$ fort. Dabei ist $BA' = AB' = AB . \sin \alpha$, während $AB'' = AB . \sin \beta$,

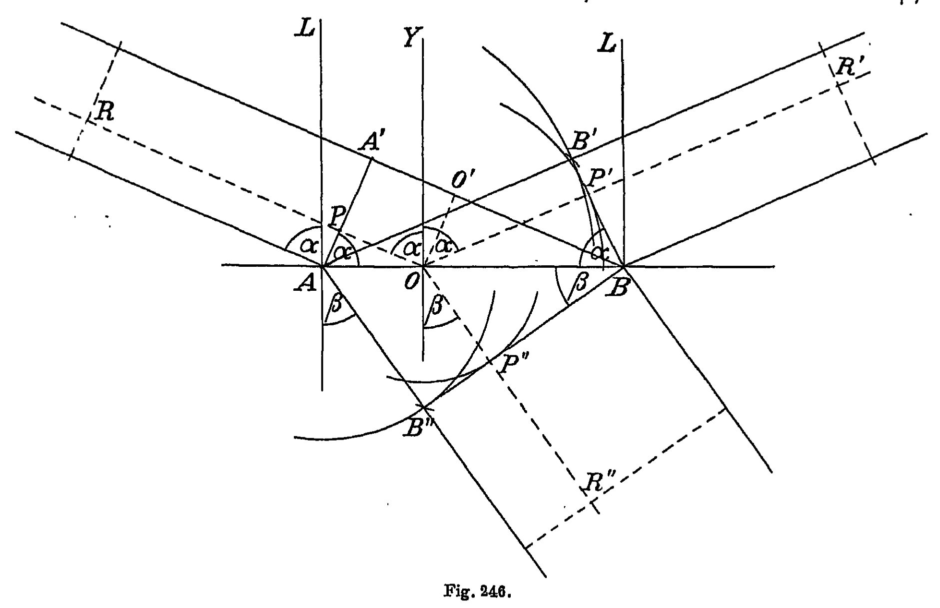


Fig. 246.

wenn β der Winkel ist, welchen der gebrochene Strahl mit dem Einfallslothe einschließt; der Winkel β heißt daher „Brechungswinkel". Wenn also die Welle diese Strecken AB' und AB'' in der Zeit t zurücklegt, so ist demnach $AB' = A'B = c_1 t$ und $AB'' = c_2 t$, und daher besteht die Gleichung:

$$\frac{BA'}{AB''} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n.$$

Der Quotient n aus dem Sinus des Einfallswinkels und dem Sinus des Brechungswinkels behält also immer denselben Wert bei, und dieser ist auch gleich dem Quotienten aus den beiden Fortpflanzungsgeschwindigkeiten; man bezeichnet ihn als den Brechungsexponent-, index oder -coëfficient. Dieses Gesetz wurde zuerst um das Jahr 1620 von Willebrord Snellius aufgestellt, der damals Professor an der Universität Leyden war. Mit der räumlichen Theilung der Wellenstrahlen ist aber auch eine Theilung der lebendigen Kraft der Welle verbunden, die nach den Regeln des elastischen Stoßes erfolgt.

Die Fortpflanzung der Welle im gleichen Medium entspricht dem elastischen Stoße zweier Kugeln, welche gleich große Massen besitzen. In diesem Falle geht die ganze Energie der stoßenden Kugel auf die gestoßene über und so pflanzt sich auch die Welle durch ein elastisches Medium ohne wesentliche Energieverluste senkrecht zur Wellenfläche fort. Anders gestalten

sich die Verhältnisse, wenn zwei elastische Kugeln mit verschiedenen Massen zusammenstoßen. Hat die stoßende Kugel die größere Masse, so erfährt sie zwar beim Stoße eine Verminderung ihrer lebendigen Kraft, aber sie setzt ihren Weg über die Stoßstelle hinaus fort und erleidet daher keine Phasenverschiebung. Die gestoßene Kugel tritt zugleich die Schwingung mit derselben Phase an, die ihr die größere mitgetheilt hat. Wenn dagegen eine Kugel mit kleinerer Masse gegen eine solche mit größerer Masse stößt, so prallt die kleinere Kugel nach dem Stoße zurück und geht daher in eine Phase über, als hätte sie eine halbe Schwingung übersprungen. Zugleich gibt sie einen kleinen Theil ihrer lebendigen Kraft an die größere Kugel ab, welche die unterbrochene Schwingung der kleineren Kugel der Phase nach fortsetzt. Ähnliche Erscheinungen zeigen sich auch beim Übergang einer Welle in ein anderes Medium. Die gebrochene Welle beginnt an der Grenzstelle immer mit derselben Phase, mit der die Welle im ersteren Medium dort angekommen ist; die reflectierte Welle kehrt aber in dasselbe Medium ohne Phasenverschiebung zurück, wenn das erstere Medium dichter ist als das zweite, und es wird Verdichtung als Verdichtung, Wellenberg als Wellenberg und Wellenthal als Wellenthal reflectiert. Wenn dagegen das zweite Medium dichter ist als das erste, so tritt bei der Reflexion eine Phasenverschiebung um eine halbe Wellenlänge ein, und es wird die Verdichtung als Verdünnung und eine Verdünnung als Verdichtung oder Wellenberg als Wellenthal und umgekehrt reflectiert. Bildet der Wellenstrahl mit der Grenzfläche der Medien einen rechten Winkel, so erhalten wir zwei sich kreuzende Wellenzüge von gleicher Wellenlänge, und diese vereinigen sich zu einer stehenden Welle. Ist das zweite Medium viel dünner als das erste, sodass die zurückkehrende Welle fast dieselbe Intensität hat, so stellen sich an der Grenzfläche Schwingungsbäuche ein, weil sich je zwei Wellenberge oder zwei Wellenthäler gegenseitig verstärken, während die Reflexion an einem dichteren Medium mit einem Phasenunterschiede von einer halben Wellenlänge verbunden ist. Daher gehen die Verdichtungen in Verdünnungen über, und es bilden sich hier Knotenpunkte. Letzteres ist insbesondere der Fall bei jeder Reflexion an einer festen Wand.

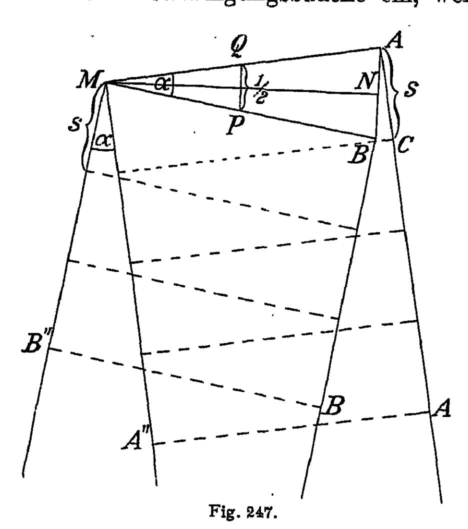


Fig. 247.

Interferenz. In Fig. 247 sei MA die Wellenfläche eines Strahles der in der Richtung $A''M$ nach M kommt, und MB sei die Wellenfläche eines zweiten Wellenstrahles, der in der Richtung $B''M$ nach demselben Punkte gelangt. Haben die beiden Wellenzüge gleiche Wellenlänge und gleiche Schwingungsdauer, so werden sich die Wirkungen in M addieren, und wir erhalten hier die doppelte Wirkung, wenn die beiden Wellenzüge mit der gleichen Phase ankommen. Die Wellenlänge beider Wellenzüge sei gleich $\lambda = AB = AC = s$; der Winkel, unter dem sich die beiden Wellenzüge schneiden, sei so klein, dass die Punkte B und C nahezu in einen zusammenfallen. Da in A die nämliche Phase vorhanden

ist wie in M und in B, so herrscht auch noch im Punkte B dieselbe Phase wie in C, das um eine Wellenlänge von A entfernt ist. Der Punkt P liegt in der Mitte zwischen AM und der Wellenfläche durch C, und daher ist hier von Seite des ersten Wellenstrahles die entgegengesetzte Phase von A und C; da aber dieser Punkt auch in der Wellenfläche MB liegt und daher dieselbe Phase haben muss, wie die Schwingung in M und A, so heben sich hier die entgegengesetzten Phasen gegenseitig auf, während sie sich in M und B unterstützen. Wenn also die Wellenflächen zweier Wellenzüge nahezu in eine Ebene fallen, so treten in derselben Gebiete auf, in welchen sich die Schwingungen gegenseitig aufheben wie in P und Q, und solche, wo sie sich unterstützen wie in A, B und M. Ist AM die Entfernung zweier Stellen, in denen sich die Schwingungen gegenseitig unterstützen, so ist offenbar $AN = \frac{\lambda}{2} = MN \,.\, \text{tang}\, \frac{\alpha}{2}$, wenn α der Winkel ist, den beide Strahlen miteinander einschließen. Für sehr kleine Winkel ist daher auch $\lambda = MN \,.\, \text{tang}\, \alpha$.

Längs der Strecken AM und BM interferieren der Reihe nach die verschiedensten Phasen beider Wellenzüge und bilden so neue Interferenzwellen mit den verschiedensten Wellenlängen.

Beugung. CD stelle (Fig. 248) eine feste Wand dar, welche bei AB eine Öffnung besitzt, durch welche ein Wellenstrahl hindurchgeht, und AB sei eine Wellenfläche desselben. Dringen diese Wellen in den Raum unterhalb CD, so gibt es neben $A''B''$ und allen dazu parallelen Tangentialebenen noch andere gemeinsame Tangentialebenen für die verschiedenen Kugelwellen von gleicher Phase; eine derselben ist z. B. die Strecke AB''. Von dieser Wellenfläche wird ein neuer Wellenstrahl ausgehen, der die Richtung AQ annimmt, und daher von der Richtung AP um einen Winkel α abweicht. Der Wellenstrahl, der bei AB angekommen ist, setzt also seinen Weg nicht ausschließlich geradlinig fort, sondern er erfährt eine Beugung um die Ecke A und ruft außerhalb des Gebietes $ABP'P$ Wellenbewegungen hervor, allerdings um so weniger, je mehr der Beugungsstrahl AQ von der Richtung AP abweicht. Diese Ablenkung des Strahles von seiner ursprünglichen Richtung, wenn seine Fortpflanzung an einer Stelle A plötzlich gehemmt wird, bezeichnet man als Beugung. Während also bei der Brechung eine Ablenkung von der ursprünglichen Richtung nur auftritt, wenn der Strahl auf der Begrenzungsfläche nicht senkrecht steht, und dabei der Strahl in ein Medium mit einer anderen Dichte übertritt, stellt sich hier eine Richtungsänderung auch dann ein, wenn der Strahl auf der Ebene CD senkrecht steht und das Medium in beiden Räumen dasselbe bleibt.

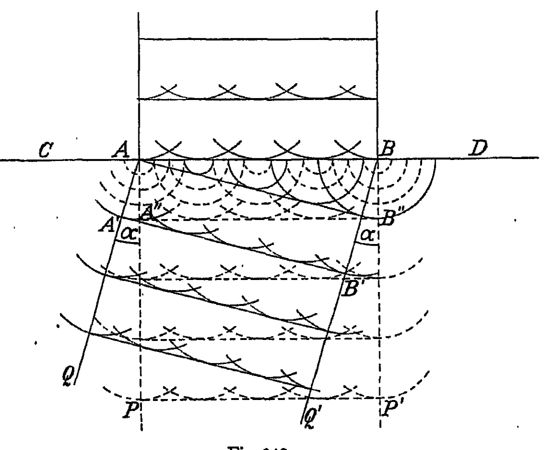


Fig. 248.

Die Brechung, Interferenz und Beugung sind besonders charakteristische Kennzeichen dafür, dass eine Erscheinung auf Wellenbewegungen zurückzuführen ist.

Akustik.

Viele Luftschwingungen rufen, wenn sie in unser Ohr dringen, in demselben Schallwahrnehmungen hervor. Es gibt aber auch Luftschwingungen, die das Ohr nicht mehr als Schall empfindet, und umgekehrt lässt sich selbst durch einen auf das Ohr ausgeübten Reiz eine Schallempfindung hervorrufen, die nicht von Luftschwingungen ausgeht. Obwohl sich also die Akustik oder die Lehre vom Schalle zunächst nur mit den hörbaren Luftschwingungen zu beschäftigen hätte, werden wir uns in diesem Abschnitte auch mit den Schwingungen der gasförmigen Körper im Allgemeinen befassen und aus denselben die charakteristischen Eigenschaften der Schallempfindungen ableiten.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles. Dass für gewöhnlich die Luft der Träger der Schallwellen ist, hat schon Otto von Guericke durch einen Versuch mit der von ihm erfundenen Luftpumpe gezeigt, da ja eine im Recipienten einer Luftpumpe läutende Glocke um so weniger hörbar wird, je mehr man die Luft aus demselben entfernt. Ein zweiter wesentlicher Fortschritt in der Erkenntnis der Ursache des Schalles bestand in der Messung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit, welche zuerst die französischen Minoriten Gassendi und Mersenne ausführten und die von den Mitgliedern der Academia del Cimento in Florenz im Jahre 1656 wiederholt wurde, indem man in der Entfernung von drei Meilen zwei Kanonen aufstellte und die Zeit beobachtete, die zwischen der Explosion und der Ankunft des Knalles vergieng. Eine genauere, nach derselben Methode ausgeführte Messung wurde im Jahre 1738 von der Pariser Akademie veranlasst, die dem richtigen Werte schon sehr nahe kam; durch die von Professor Kundt in Straßburg im Jahre 1866 entdeckten Staubfiguren gelang es endlich, die Messung nicht nur genauer, sondern auch innerhalb des Raumes von einigen Metern und für verschiedene Gase durchzuführen.

Man gelangte so zum Resultate, dass die Fortpflanzungsgeschwindigkeit auch von der Temperatur abhängig sei, dass also $c = 331{\cdot}8\sqrt{1 + \alpha t}$ ist, wobei $\alpha = 0{\cdot}00367$ den Ausdehnungscoëfficient der Luft bedeutet.

Wenn man in eine Röhre von etwa 2 cm Durchmesser (Fig. 249), die am einen Ende durch einen Stempel verschlossen ist, sehr feines Korkpulver

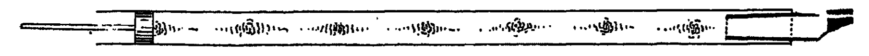


Fig. 249.

oder Licopodium streut und am anderen Ende mittels eines kurzen Pfeifchens einen sehr hohen Ton anbläst, so sammeln sich die Staubtheilchen zu regelmäßig ausgebildeten Gruppen, den sogenannten Kundt'schen Staubfiguren. Die in die Röhre eindringenden Schallwellen werden nämlich am verschlossenen Ende wie an einer festen Wand reflectiert, und es bilden sich daher hier wie an allen jenen Stellen Knotenpunkte, wo sich die Schwingungsphasen der ankommenden und der reflectierten Wellen gegenseitig aufheben. Je zwei Staubfiguren stellen miteinander eine ganze stehende Welle dar. Pflanzen sich also die Wellen in der Luft mit der Geschwindigkeit c fort, so ist die Länge einer Welle $\lambda = c\,T$ und daher $c = \frac{\lambda}{T} = \lambda n$, wobei T die Dauer einer Schwingung und $\frac{1}{T} = n$ die Zahl der Schwingungen in einer Secunde bedeutet.

Wollen wir nach der von Newton aufgestellten Formel $c = \sqrt{\frac{E}{d}}$ die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Schallwellen im Wasser mit der Dichte $d = 1$ berechnen, so brauchen wir nur den Wert von E zu kennen. Da sich das Wasser bei einem Drucke p von 1 Atm. $= 76 \,.\, 13{\cdot}59 \,.\, 981$ Dyn cm^{-2} im Verhältnis $5 : 10^5$ zusammendrücken lässt, so ist $p = 1013000 = E \,.\, \frac{5}{100000}$ und daher $E = 20260000000$ und $c = 142300 \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$. Die Versuche, welche Colladon und Sturm im Jahre 1827 im Genfersee vornahmen, ergaben in der That eine Fortpflanzungsgeschwindigkeit von $1435 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$.

Wenden wir diese Formel auf Gase, also in erster Linie auf Luft an, so müssen wir $E = p$ setzen, denn nach dem Mariotte'schen Gesetze ist

$$P = \frac{v}{V} \cdot p = E \,.\, \frac{l}{L} = E \frac{lq}{Lq} = E \frac{v}{V}.$$

Andererseits ist $d = 0{\cdot}001293 \,.\, \frac{1}{(1 + \alpha t)} \cdot \frac{b}{76}$, während

$$E = b' \,.\, 13{\cdot}59 \,.\, 981 = b' \,.\, 13330.$$

Mithin ist $\frac{E}{d} = \frac{b' \,.\, 13330\,(1 + \alpha t) \,.\, 76}{b \,.\, 0{\cdot}001293} = \frac{b'}{b} \,.\, (1 + \alpha t) \,.\, 783600000$ und

$$c = 28000 \sqrt{\frac{b'}{b}(1 + \alpha t)} \; \frac{\text{cm}}{\text{sec}}.$$

Dabei bezieht sich aber b auf den Durchschnittswert des Druckes, aus dem wir die Dichte d bestimmt haben, b' dagegen auf die durch die Schwingungen hervorgerufenen Druckveränderungen, welche wegen der kurzen Schwingungsdauer adiabatische Verdichtungen herbeiführen; infolge der gleichzeitigen Erwärmung treten diese $k$mal stärker auf, wobei $k = 1{\cdot}41$ das Verhältnis der specifischen Wärme bei constantem Druck zu der bei constantem Volumen darstellt, und daher ist der Quotient $\frac{b'}{b} = 1{\cdot}41$. Solange man diesen Einfluss der adiabatischen Verdichtung nicht erkannt hatte, ergab also die Berechnung nur eine Geschwindigkeit von $280 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$; nach der Multiplication mit $\sqrt{1{\cdot}41} = 1{\cdot}19$ erhält man aber $c = 33300 \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$, was mit den Resultaten der experimentellen Untersuchung nahezu übereinstimmt.

Andererseits kann man den mit Hilfe der Kundt'schen Staubfiguren gewonnenen Wert der Fortpflanzungsgeschwindigkeit dazu benützen, die sonst schwer bestimmbare Zahl k, welche das Verhältnis der beiden specifischen Wärmen angibt, aus dieser Formel zu berechnen.

Füllen wir die Röhre, in welcher sich die Staubfiguren bilden, mit anderen Gasen, so treten beim gleichen Tone Staubfiguren von anderer Länge auf, und daher wird sich der Schall in dem bestreffenden Gase mit einer anderen Geschwindigkeit fortpflanzen als in der Luft. In $\frac{\text{m}}{\text{sec}}$ ausgedrückt beträgt die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in Kohlensäure 260, in Sauerstoff 316, und in Wasserstoff $1265 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$.

Nach anderen Methoden lässt sich sogar für feste Körper die Fortpflanzungsgeschwindigkeit bestimmen, und so ergibt sich z. B. für Blei 1300, für Holz und Glas 3000—5000, für Kupfer 3700 und für Stahl $5300 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$.

Das Echo. Wir haben bereits darauf hingewiesen, dass in der Röhre, in welcher sich die Kundt'schen Staubfiguren bilden, eine Reflexion eintreten muss, damit stehende Wellen zustande kommen. Der reflectierte Wellenzug macht sich aber auch dann geltend, wenn der Ausbreitung der Welle nach allen Richtungen keinerlei Hindernisse im Wege stehen, wie es gewöhnlich beim Echo der Fall ist. A sei (Fig. 250) der Ausgangspunkt einer Wellenbewegung und MN eine ebene Wand, an der die Schallwellen reflectiert werden. Der in B auffallende Wellenstrahl gelangt nach der Reflexion zum Punkte C, weil $\alpha_1 = \alpha_2$. Die Zeit, welche der Schall braucht, um diesen Weg zurückzulegen, ist $t_2 = \frac{(AB + BC)}{c}$.

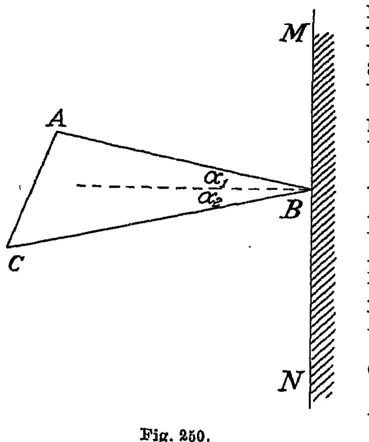


Fig. 250.

Von A nach C gelangt er in der Zeit $t_1 = \frac{AC}{c}$ und kommt daher in C um die Zeit $t_2 - t_1 = \frac{(AB + BC - AC)}{c}$ früher an, als der bei B reflectierte Schall. Zwei Laute vermögen wir aber nur dann getrennt wahrzunehmen, wenn zwischen denselben ungefähr ein 0·1 Secunde verstreicht.

Um also in C den reflectierten von dem direct aus A kommenden Schall unterscheiden zu können, muss $AB + BC - AC = 0{\cdot}1 \,.\, 332 = 33{\cdot}2$ m, und daher der reflectierte Wellenstrahl um 33·2 m länger sein, als die kürzeste Entfernung von der Schallquelle. Ist $AC = O$ und $AB = BC$, so ist $AB = 16{\cdot}6$ m; in dieser Entfernung von der Wand müssen wir uns also befinden, um eine reflectierte Silbe von der ursprüglichen unterscheiden zu können. Damit demnach das Echo erst nach einer zweiten Silbe an unser Ohr gelange, muss $2 \,.\, AB = 2 \,.\, 33{\cdot}2$ m, also die Entfernung von der Wand 33·2 m betragen u. s. w.

Vom mehrsilbigen Echo muss man das mehrfache Echo unterscheiden, das zustande kommt, wenn der Schall von mehreren reflectierenden Wänden in verschiedenen Entfernungen zurückgeworfen wird. Ist eine Wand zu nahe, als dass die reflectierten Laute vollständig zur Geltung kämen, so spricht man nur von einem Nachhall.

Die Stärke des Schalles. Wenn sich die Schallwellen kugelförmig nach allen Richtungen ausbreiten können, so nimmt ihre Intensität, wie die aller anderen Wellen proportional mit dem Quadrat der Entfernung ab, weil die Verdichtungsarbeit in der doppelten Entfernung auf eine viermal größere Fläche ausgedehnt wird. Verhindert man diese Ausbreitung der Wellenfläche, so nimmt die Intensität nicht so rasch ab. Der vor einer ebenen Wand stehende Redner kann seine Stimmkraft doppelt stärker zur Geltung bringen, als der freistehende. Das vom Munde weg sich sehr langsam erweiternde Sprachrohr bewirkt, dass sich die Schallwellen nicht so schnell zu Kugelwellen ausbilden können und dass daher der größere Theil derselben als ebene Wellenfläche mit relativ großer Stärke in weitere Entfernungen vordringt. Sorgt man endlich dafür, dass sich die Wellenfläche gar nicht ausbreiten kann, wie es der Fall ist, wenn sie in einer Röhre von durchwegs gleichem Querschnitt fortschreitet, so nimmt die Stärke auch in sehr großen

Entfernungen nur unmerklich ab, und darauf beruht das Sprachrohr, wie man es anwendet, um zwischen entfernteren Localitäten oder z. B. zwischen der Commandobrücke auf dem Dampfschiffe und dem Maschinenraume einen unmittelbaren Verkehr zu ermöglichen.

Das Höhrrohr, dessen sich die Schwerhörigen bedienen, hat die Aufgabe, die Energie eines größeren Theiles der Wellenfläche zu sammeln und so den Reiz auf das Gehörorgan zu verstärken.

Die Interferenz der Schallwellen. Die stehenden Wellen, welche die Staubfiguren hervorrufen, sind nicht nur ein Beweis für die Reflexion der Wellen, sondern auch für deren Interferenz, da sich die stehenden Wellen nur durch die periodische Tilgung und Verstärkung der Schwingungen bilden können. Die Interferenz kommt aber auch beim folgenden Versuche zur Geltung. In ein Röhrensystem von der Form Fig. 251 dringen durch den Röhrenansatz *C* Schallwellen ein, die sich sowohl durch die Zweigleitung *A* wie auch über *B* bis *D* fortpflanzen können. Wenn wir die U-förmige Röhre *B* weiter herausziehen, so wird auf dieser Seite der Weg länger, und daher können wir es durch Verschieben dieser Röhre erreichen, dass sich die Wellen in der Röhre *D* entweder gegenseitig aufheben, wenn sie die entgegengesetzte Phase besitzen oder dass sie sich bei Phasengleichheit verstärken.

D
B
A
C

Fig. 251.

Die Beugung der Schallwellen zeigt sich besonders in der bekannten Erscheinung, dass sich der Schall nicht nur geradlinig ausbreitet, sondern auch an Orten wahrnehmbar ist, zu denen die Wellen nur auf krummlinigen Bahnen gelangen können. Dieser Erscheinung gegenüber tritt bei den Schallwellen die strahlenförmige Ausbreitung sogar in den Hintergrund. Deshalb ist auch der durch ein Haus oder durch eine Mauerecke hervorgerufene akustische „Schatten" nicht so scharf ausgeprägt, wie beim Licht.

Die Tonhöhe. Zwei Schallwahrnehmungen können sich außer durch die Stärke des Schalles auch noch durch die Tonhöhe unterscheiden. Die Tonhöhe kommt um so mehr zur Geltung, je reiner der Ton ist. Die reinsten Töne erhält man von solchen Schallerregern, welche Schwingungen von stets gleichbleibender Gestalt ausführen und deren Verschiebungen der Formel $x = a \cdot \sin \frac{2\pi}{T} \cdot t$ möglichst nahekommen. Die Schwingungen einer tönenden Stimmgabel kann man ersichtlich machen, indem man an einer Zinke eine dünne Metallspitze befestigt und dann die tönende Stimmgabel über eine beruste Glasscheibe gleiten lässt. Auf diesem Wege lässt sich auch die Schwingungszahl der Stimmgabel „fibrographisch" feststellen. Ist dieselbe einmal bestimmt, so ist sie ein vorzügliches Mittel, um sehr kleine Zeiträume zu messen.

Wie die Höhe des Tones mit der Schwingungszahl zunimmt, kann man mit Hilfe der verschiedenen Sirenen zeigen.

Die S i r e n e v o n S a v a r t besteht aus einem Zahnrade, gegen das man ein Stück Carton hält, welches durch die darunter weggleitenden Zähne zu einer schwingenden Wellenfläche wird. Der beim Drehen entstehende Ton wird um so höher, je rascher das Rad gedreht wird, also je mehr Schwingungen auf eine Secunde entfallen.

Die S i r e n e v o n S e e b e c k ist eine Scheibe mit m auf der Peripherie eines Kreises liegenden Löchern; bläst gegen dieselben ein Luftstrom, während man die Scheibe um ihre Achse dreht, so wird der Luftstrom während jeder Drehung m mal unterbrochen, und er erleidet also in der Secunde mn Unterbrechungen, wenn die Scheibe in der Secunde n Umdrehungen macht.

Das musikalisch gebildete Ohr ist besonders für die Gleichheit der Tonhöhe außerordentlich empfindlich und daher befähigt, dieselbe mit großer Genauigkeit festzustellen.

Die Schwingungszahl eines Tones lässt sich dadurch bestimmen, dass man eine Sirene so rasch dreht, bis sie einen gleich hohen Ton gibt. Sie ist gleich dem Product aus der Umdrehungszahl und der Zahl der Löcher. Verlässlicher ist die Bestimmung der Tonhöhe durch Vergleichung derselben mit den Tönen verschiedener Stimmgabeln, deren Schwingungszahl man kennt.

In allen Tonlagen ist aber die Bestimmung der Tonhöhe mit Hilfe der Staubfiguren die verlässlichste, und sie ergibt sich einfach, indem man die in $\frac{\text{cm}}{\text{sec}}$ ausgedrückte Fortpflanzungsgeschwindigkeit durch die in cm gemessene Länge zweier Staubfiguren dividiert. Die Schwingungszahl bezeichnet man als die a b s o l u t e T o n h ö h e.

Die Tonintervalle. Stellen wir zwei Stimmgabeln nebeneinander auf, welche genau dieselbe Schwingungsdauer haben, so erhalten wir wohl den Eindruck eines verstärkten, aber nie eines erhöhten Tones, gleichviel ob die Schwingungsphasen übereinstimmen oder nicht. Belasten wir aber die Zinken der einen Stimmgabel mit etwas Wachs, sodass sie dessen Masse bei jeder Elongation eine gewisse Beschleunigung ertheilen, so wird dadurch die Schwin-



Fig. 252.

gungsdauer etwas verlängert und daher die Schwingungszahl herabgesetzt. Zugleich treten langsame Verstärkungen und Schwächungen der Tonstärke auf, die man als S c h w e b u n g e n bezeichnet. Aus der graphischen Darstellung solcher Schwingungen (Fig. 252) ergibt sich, dass die resultierende Schwingung zu einer Wellenbewegung mit wechselnder Amplitude führt, und dass bei jedem Anschwellen die eine Stimmgabel der anderen um eine Schwingung vorauseilt. Entfällt also auf jede Secunde eine Schwebung, so macht die eine Stimmgabel in jeder Secunde um eine Schwingung mehr als die zweite. Je stärker wir die eine Stimmgabel belasten, desto mehr häufen sich die Schwebungen, bis sie schließlich nur mehr als ein dem Ohre unangenehmes Zittern der Tonhöhe bemerkbar werden. Bei zunehmender Differenz der Schwingungszahlen hört das Unangenehme dieses Doppelklanges wieder auf, und endlich stellt sich die Empfindung zweier Töne ein, die verschieden klingen, ohne eine unangenehme Gesammtwirkung hervorzubringen.

Benützen wir zur Tonerregung eine Sirene mit zwei Reihen von Löchern, deren Zahlen sich wie 1 : 2 verhalten, so machen die hervorgerufenen Töne einen auffallend ähnlichen Eindruck auf das Ohr, und man bezeichnet den Unterschied in der Tonhöhe als eine Octave.

Einen wesentlich verschiedenen Eindruck machen zwei Töne auf das Ohr, wenn das Verhältnis der Schwingungszahlen ein anderes ist. Bringen wir auf der Sirene acht Lochreihen an, bei welchen sich die Zahlen der Öffnungen wie

$$n : \frac{9}{8} n : \left(\frac{6}{5} n\right) : \frac{5}{4} n : \frac{4}{3} n : \frac{3}{2} n : \frac{5}{3} n : \frac{15}{8} n : 2 n$$

verhalten, so machen die ihnen entsprechenden Töne, der Reihe nach gehört, auf das Ohr einen angenehmen Eindruck. Man nennt diese in derselben oder umgekehrten Reihenfolge hervorgebrachten Töne die „Tonleiter“ oder „Scala“. In anderen Reihenfolgen vermögen diese Töne sogar auf unser Gemüth eine Wirkung auszuüben, die an eine freudige, wehmüthige oder gehobene Stimmung erinnert, und werden dadurch zur „Melodie“.

Das Zusammenklingen des ersten, dritten und fünften Tones macht auf das Ohr ganz besonders den Eindruck von Kraft und Tonfülle und wird als „Harmonie“ bezeichnet. Diese den verschiedenen Tonleitern entnommenen „Dreiklänge“ bezeichnet man als Accorde. Die einzelnen Töne, deren Schwingungszahlen zueinander in diesem Verhältnisse stehen, bezeichnet man, ohne dabei auf die absolute Tonhöhe Rücksicht zu nehmen, beziehungsweise als Prim, Secund, (kleine Terz) große Terz, Quart, Quint, Sext, Septim und Octav. Das Verhältnis ihrer Schwingungszahlen nennt man ihr Toninterval oder die relative Tonhöhe.

Zu den einzelnen Tönen dieser schon der pythagoräischen Schule im 6. Jahrhundert v. Chr. bekannten Tonreihe gelangt man fast ausschließlich durch Anwendung der Octav und der Quint, die nebst der Octav mit dem Grundton am besten zusammenklingt. Bezeichnen wir der Einfachheit wegen die Schwingungszahlen des Grundtones, der Quint und der Octav mit 1, $\frac{3}{2}$ und 2, so gelangen wir zu den übrigen Intervallen durch folgende Toncombinationen. Das Intervall zwischen Quint und Octav ist nämlich die Quart, denn $2 : \frac{3}{2} = \frac{4}{3}$, und wenn man vom Grundton um zwei Quinten hinauf und dann um eine Octav herabsteigt, so gelangt man zur Secund, da $\left(\frac{3}{2} \cdot \frac{3}{2}\right) : 2 = \frac{9}{8}$; steigen wir von diesem Tone um zwei Quinten hinauf, so erhalten wir einen Ton mit dem Schwingungsverhältnis $\frac{9}{8} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{3}{2} = \frac{81}{32}$; dieser Ton unterscheidet sich von dem Tone mit dem Schwingungsverhältnisse $\frac{80}{32} = \frac{5}{2}$ nur um das kaum merkliche Intervall $\frac{81}{80}$, das man als Komma bezeichnet. Der Ton mit dem Schwingungsverhältnisse $\frac{5}{2}$ ist die Octav der großen Terz $\frac{5}{4}$, die der „Dur-Tonleiter“ angehört. Die Quint der Terz ist die Septim, denn $\frac{5}{4} : \frac{2}{3} = \frac{15}{8}$; gehen wir von der Octav der großen Terz $\frac{5}{2}$ um eine Quint herab, so gelangen wir zur Sext, da $\left(\frac{5}{4} \cdot 2\right) : \frac{3}{2} = \frac{5}{3}$; das Intervall zwischen der Quint und der großen Terz ist endlich die kleine Terz, weil $\frac{3}{2} : \frac{5}{4} = \frac{6}{5}$. Letztere kommt in der „Moll-Tonleiter“ vor.

Untersuchen wir die Intervalle zwischen den einzelnen Tönen der Tonleiter, so finden wir, dass dieselben drei verschiedene Werte haben. Es ist nämlich:

$$\frac{9}{8}:1=\frac{9}{8},\ \left(\frac{6}{5}:\frac{9}{8}=\frac{16}{15}\right),\ \frac{5}{4}:\frac{9}{8}=\frac{10}{9},\ \frac{4}{3}:\frac{5}{4}=\frac{16}{15},\ \frac{4}{3}:\frac{6}{5}=\frac{10}{9},\ \frac{3}{2}:\frac{4}{3}=\frac{9}{8},$$

$$\frac{5}{3}:\frac{3}{2}=\frac{10}{9},\ \frac{15}{8}:\frac{5}{3}=\frac{9}{8},\ 2:\frac{15}{8}=\frac{16}{15}.$$

Von den beiden Intervallen $\frac{9}{8}$ und $\frac{10}{9}$ ist das erstere das größere; sie unterscheiden sich aber nur um das schon erwähnte Komma mit dem Schwingungsverhältnisse $\frac{9}{8}:\frac{10}{9}=\frac{81}{80}$. Man bezeichnet daher diese beiden Intervalle beziehungsweise als den großen und den kleinen ganzen Ton. Außerdem kommt noch das Intervall $\frac{16}{15}$ zwischen der kleinen Terz und der Secund oder zwischen der großen Terz und der Quart, und zwischen der Septim und Octav vor. Man nennt es einen halben Ton, da zwei solche Intervalle nahezu einen ganzen Ton geben, denn $\frac{16}{15}\cdot\frac{16}{15}=\frac{256}{225}=\frac{10{\cdot}2}{9}=\frac{9{\cdot}07}{8}$.

Mit der Feststellung des Schwingungsverhältnisses sind die Unterschiede der Tonhöhe so weit bestimmt, als es für die Harmonie in der Musik nöthig ist. Die absolute Tonhöhe ist für dieselbe nur insoferne von Bedeutung, dass die „Tonlage" einer „Arie" mit dem Bereiche der verfügbaren Stimmmittel zusammenfallen und den verwendeten Instrumenten angepasst sein muss. Der Benedictiner Guido von Arezzo war der erste, der ein den musikalischen Bedürfnissen gut angepasstes Notensystem aufstellte, in welchem jeder Note eine bestimmte absolute Tonhöhe beigelegt wird, dass der geübte Sänger durch den bloßen Anblick der Noten ein noch nie gehörtes Lied „vom Blatte weg" in einer bestimmten Tonlage singen kann. Dabei werden bereits die noch heutzutage üblichen 5 parallelen Linien verwendet, in welche die Noten je nach der absoluten Tonhöhe in verschiedenen Lagen eingetragen werden. Um jede Note auch nennen zu können, wählte er (1026) die im Drucke hervorgehobenen Silben der Choralstrophe:

Ut queant laxis **re**sonare fibris
Mira gestorum **fa**muli tuorum
Solve polluti **la**bii reatum
Sancte Johannes.

Die den einzelnen Tönen der Octave entsprechenden Silben: *ut* (*do*), *re*, *mi*, *fa*, *sol*, *la*, *si*, *ut* wurden dann in den nördlichen Gegenden von *la* angefangen durch die Buchstaben *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f*, *g* und $\overline{a}$ ersetzt. Dabei bezeichnete man anfangs nicht nur den Ton *si* selbst, sondern auch den zwischen *la* und *si* liegenden halben Ton mit *b* und ersetzte erst später, um diese beiden halben Töne zu unterscheiden, das dem *si* entsprechende *b* durch den nächsten Buchstaben *h*, weshalb jetzt die Töne derselben Tonleiter der Reihe nach mit den Buchstaben *c*, *d*, *e*, *f*, *g*, *a*, *h* und *c* benannt werden. Die zwischen denselben liegenden halben Töne bezeichnet man dann mit *cis*, *dis*, *fis*, *gis* und dem schon erwähnten *b* und deutet diese Erhöhung in der Notenschrift durch ein auf dieselbe Linie geschriebenes ♯ (*b*-durum oder Kreuz) an, während das ♭ (*b*-molle) eine Erniedrigung um einen halben Ton angibt. Aus der mit *c* beginnenden und die große Terz enthaltenden *c*-„Dur-Tonleiter" erhält man die „Moll-Tonleiter", indem man vor die Terz -*e*- das ♭ (*b*-molle) schreibt, wodurch dieser Ton durch *dis* ersetzt und statt der großen Terz $\left(\frac{5}{4}\right)$, die kleine Terz $\left(\frac{6}{5}\right)$ eingeführt wird. Die Tonleiter *c*, *d*, *dis*, *e*, *f*, *g*, *a*, *h*, *c* hat also die halben Töne zwischen *d* und *dis* und zwischen *h* und *c*. Den Dreiklang *c*, *dis* und *f* nennt man einen Mollaccord.

Wenn man zwischen alle ganzen Töne die halben Töne einschaltet, so erhält man die aus 12 Tönen bestehende chromatische Tonleiter.

Wäre ein Musikinstrument so eingerichtet, dass es auch auf die Unterschiede zwischen großen und kleinen ganzen Tönen Rücksicht nimmt, so müssten z. B. bei

einer Orgel oder beim Klavier die Tasten außerordentlich vermehrt und viele neue Töne eingeschaltet werden, um von jedem Tone ausgehend dieselbe Melodie oder denselben Accord richtig spielen zu können. Diesem Übelstande beugt man in der Weise vor, dass man alle halben Töne der chromatischen Scala einander gleich macht und für alle dasselbe Schwingungsverhältnis wählt. Da sich aber in der Musik unreine Octaven am unangenehmsten fühlbar machen, so wählt man das Intervall des halben Tones so, dass die Octaven rein bleiben und zwölf halbe Töne die Octav geben. Bedeutet also x dieses Schwingungsverhältnis, so muss $x^{12} = 2$, also $x = \sqrt[12]{2} = 1{\cdot}05946$. Die aus solchen halben Tönen zusammengestellte Scala nennt man daher die Tonleiter mit gleichschwebender Temperatur. An Stelle der kleinen Terz $\frac{6}{5} = 1{\cdot}2$ erhalten wir dann die relative Tonhöhe 1·196, statt der großen Terz $\frac{5}{4} = 1{\cdot}25$ den Wert 1·266 und statt der reinen Quint $\frac{3}{2} = 1{\cdot}5$ den Betrag 1·498, also einen so nahestehenden Wert, dass auch ein geübtes Ohr die Unreinheit kaum wahrnehmen kann, nur die große Terz ist relativ unrein. Um empfindliche Dissonanzen zu vermeiden, muss in einem Orchester jedes Instrument auf einen bestimmten Grundton „gestimmt“ werden. Je nach der Wahl dieses Grundtones gab es lange Zeit hindurch fast in allen Ländern verschiedene „Stimmungen“. Schon im 17. Jahrhundert erwachte das Bedürfnis nach einer einheitlichen Stimmung, aber erst im Jahre 1834 wurde auf der Naturforscherversammlung in Stuttgart ein positiver Vorschlag gemacht, dass nämlich der Ton mit der absoluten Tonhöhe von 440 Schwingungen als Normal-*a* bezeichnet werden soll. Da dieser Vorschlag auf verschiedene Schwierigkeiten stieß, wurde auf der „Wiener Stimmconferenz“ im Jahre 1885 das sogenannte „eingestrichene *a*“ mit 435 Schwingungen als „internationaler normaler Stimmton“ erklärt. Eine Stimmgabel, die bei 15° C diesen Ton gibt, bezeichnet man daher als Normalstimmgabel.

cis dis fis gis b

h c¹ d¹ e¹ f¹ g¹ a¹ h¹ c² d² e² f² g² a²

si ut re mi fa sol la si ut re mi fa sol la

244 259 290 326 345 388 435 488 517 581 652 691 775 870

Fig. 253.

Figur 253 gibt eine übersichtliche Zusammenstellung der Tasten einer Claviatur, der entsprechenden Noten, ihrer Namen und Schwingungszahlen von gleichschwebender Temperatur. Um nicht zuviele Noten über und unter die fünf Linien schreiben zu müssen, werden zwei verschiedene Tonlagen verwendet und die damit verbundene Verschiebung aller Notenwerte durch den sogenannten „Pass-Schlüssel“, beziehungsweise durch den „Violin-Schlüssel“ angedeutet, wie es aus Fig. 254 ersichtlich ist.

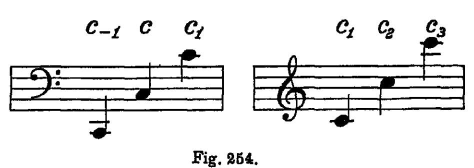


Fig. 254.

Wie lange jeder Ton in derselben Höhe andauern soll, wird durch die Form der Note angegeben, und in diesem Sinne unterscheidet man ganze Noten, die ungefähr vier Secunden andauern können, ferner halbe, Viertel-, Achtel-, Sechzehntel- und Zweiunddreißigstelnoten. Die genauere Länge der Viertelnoten für die verschiedenen „Tempo“ gibt Mälzel's „Metronom“ an.

Der antike Gesang bewegte sich größtentheils im „Unisonogesang“, d. h. alle Stimmen sangen denselben Ton oder höchstens die Octav. Ihre Wirkung lag fast ausschließlich in der Kraft einfacher Melodien. Die einseitige Ausbildung des Rhythmus führt zur Marsch- und Tanzmusik; die von großen Orchestern ausgeführten „Ton-

gemälde“ suchen besonders durch die Mannigfaltigkeit im Wechsel der Accorde immer neue Wirkungen zu erzielen. Dagegen beruht der Choralgesang, besonders wie ihn die gregorianische Kirchenmusik ausgebildet hat, und vor Allem das schlichte Volkslied auf der Macht einfacher und kräftiger Melodien.

Das Doppler'sche Princip. Wenn wir mit Hilfe der Savart'schen Sirene einen Ton erzeugen, indem wir das Zahnrad drehen und das über die Zähne gleitende Kartenblatt festhalten, so hängt natürlich die Höhe des Tones nur von der Drehungsgeschwindigkeit des Zahnrades ab. Die Zahl der Schwingungen pro Secunde und damit auch die Tonhöhe wird aber steigen, wenn wir das Kartenblatt in der entgegengesetzten Richtung über die Zähne gleiten lassen; dreht sich jedoch das Kartenblatt im gleichen Sinne um die Achse, so wird mit der Schwingungszahl auch die Tonhöhe abnehmen. Jeder Zahn auf der Peripherie bewege sich mit der Geschwindigkeit $c \frac{\text{m}}{\text{sec}}$ und die Schwingungszahl des Tones sei n, falls das Kartenblatt in Ruhe verbleibt. Bewegt sich hierauf das Kartenblatt im entgegengesetzten Sinne mit der Geschwindigkeit c', so begegnet es in der Secunde ebensovielen Zähnen, als wenn sich dieselben mit der Geschwindigkeit $c + c'$ bewegen würden und das Blatt still stände. Die Zahl der Schwingungen n' entspricht daher der Proportion $n' : n = (c + c') : c$.

Bei der Bewegung des Blattes im Sinne der Zähne mit der Geschwindigkeit c'' erzielen wir denselben Erfolg, als ob sich nur die Zähne mit der Geschwindigkeit $c—c''$ bewegen würden; in diesem Falle besteht für die Schwingungszahl n'' die Proportion $n'' : n = (c—c'') : c$.

Ferner verhält sich die früher erhöhte Schwingungszahl zur jetzt erniedrigten, also $n' : n'' = (c + c') : (c—c'')$.

Eine solche Veränderung der Schwingungszahl wird scheinbar auch dann eintreten, wenn sich die Entfernung zwischen uns und einer Schallquelle rasch ändert, sei es, dass sich dieselbe uns rasch nähert oder dass wir uns der Schallquelle nähern, beziehungsweise die Schallquelle sich von uns entfernt oder wir uns von ihr entfernen.

Befinden wir uns in einiger Entfernung von einer Glocke, und zwar in einer solchen Stellung, dass sich der Mantel der Glocke beim Läuten abwechselnd nähert und wieder entfernt, so wird der Ton im ersteren Falle höher, im zweiten tiefer zu sein scheinen als er wirklich ist. Gibt die Glocke z. B. den Ton mit 435 Schwingungen und nimmt sie beim Läuten eine Geschwindigkeit von $2 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$ an, so verhalten sich die Schwingungszahlen der scheinbar wahrgenommenen Töne $n' : n'' = (332 + 2) : (332 — 2)$, also annäherungsweise wie $81 : 80$. Die sich nähernde Glocke gibt also scheinbar einen Ton von sich, der etwa um ein Komma höher ist als der Ton der sich entfernenden Glocke. Aus demselben Grunde scheint eine Pfeife einen aus zwei verschiedenen Tönen bestehenden Triller hervorzubringen, wenn sie sehr rasch die Peripherie eines Kreises beschreibt, obwohl sie thatsächlich nur einen Ton von unveränderlicher Höhe zu erzeugen vermag.

Schallerreger. Schwingende Platten. Membranen, die wie ein Trommelfell an der ganzen Peripherie befestigt sind, schwingen so, dass sich die einzelnen Theilchen senkrecht zur Ebene des ruhenden Felles bewegen; sie schwingen also transversal. Ähnliche Bewegungen führen auch Metallplatten aus, wenn sie, wie z. B. die Eisenplatte in einem Telephon nur am Rande befestigt sind. Bleiben dagegen nur einzelne Punkte einer Metallplatte unbeweglich, so theilt sie sich meist in mehrere Abschnitte, in welchen die transversalen Schwingungen immer die entgegengesetzte Phase besitzen.

Statt der Knotenpunkte stellen sich jetzt Knotenlinien ein, deren Form davon abhängt, an welchen Punkten die Platte befestigt und wo sie zuerst

in Schwingungen versetzt wird. Wenn man eine solche Platte mit Sand bestreut und mit einem Violinbogen am Rande kräftig streicht, so sammelt sich der Sand in der Umgebung der Knotenlinien, und es bilden sich die sogenannten Chladnischen Klangfiguren (Fig. 255). Die Platten seien im Mittel-

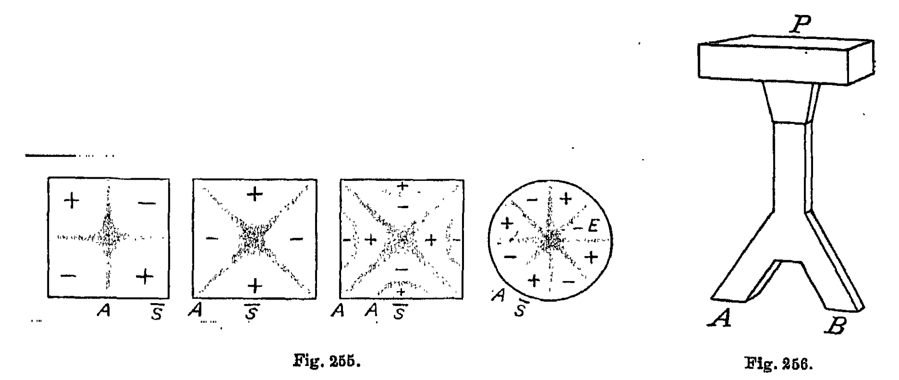


Fig. 255. Fig. 256.

punkte befestigt, bei A verhindert man das Auftreten von Schwingungen durch kräftiges Andrücken mit dem Finger, und an der Stelle S streicht man mit dem Bogen. Während die mit — bezeichneten Flächen nach unten schwingen, bewegen sich die mit + bezeichneten nach oben und umgekehrt. Davon kann man sich mit Hilfe des Apparates (Fig. 256) überzeugen, indem man die unten geöffneten Röhren A und B über zwei gleichbezeichnete Flächen hält, worauf der Sand auf der Membrane P in Schwingungen geräth, während dies nicht der Fall ist, wenn man die Öffnungen A und B über ungleich bezeichnete Flächen hält.

Auch die Glocke kann man als eine tönende Platte ansehen. Der Helm der Glocke bildet dabei den festen Punkt, durch welchen die Knotenlinien der tönenden Glocke hindurchgehen und den „Mantel" der Glocke in vier Felder theilen, von denen die zwei gegenüberliegenden abwechselnd durch den Schlag des Klöpels in Schwingungen versetzt werden. Dabei geräth auch die ganze in der Glocke und um den Mantel befindliche Luft in sehr kräftige Schwingungen, welche sich wegen ihrer großen Energie sehr weit fortpflanzen. Der Ton der Glocke ist im allgemeinen umso tiefer, je dünner der Mantel ist, und kann daher nach dem Guss noch etwas tiefer gestimmt werden. Die „Glockenspeise" besteht aus 80 Gewichtstheilen Kupfer und 20 Theilen Zinn. Die für eine bestimmte Tonhöhe zu wählenden Dimensionen werden fast ausschließlich durch die Erfahrung bestimmt. Die Erfindung der Glocken verliert sich in das graueste Alterthum. Zu kirchlichen Zwecken waren sie zur Zeit Karls, des Großen, schon vielfach in Gebrauch, und Jahrhunderte lang verkündete ihr „beredter Mund" auch alle wichtigen Ereignisse weltlichen Charakters.

Schwingende Stäbe. Ein elastischer Stab kann in longitudinale oder transversale Schwingungen versetzt werden. Schwingungen ersterer Art erhält man z. B., indem man eine Glasröhre der Länge nach mit einem nassen Tuche reibt. Transversalschwingungen erhält man dagegen, wenn man einen Metallstab frei beweglich aufhängt und in der Mitte anschlägt. Die so erregte Welle pflanzt sich dann gegen beide Enden fort und wird hier ohne Phasenverschiebung reflectiert; wir erhalten daher stehende Wellen, deren Knotenpunkte aber nicht an den Endpunkten, sondern beim ersten und letzten Viertel der Stablänge liegen.

In dieser Weise schwingen die Stäbe, aus denen die Glas- und Holzharmonica zusammengesetzt ist. Da die Länge des Stabes l eine Wellen-

länge beträgt, so ist $l = \lambda = c\,T$, also die Schwingungszahl oder die absolute Tonhöhe $n = \frac{1}{T} = \frac{c}{l}$; solche Stäbe erzeugen demnach einen um so höheren Ton, je kürzer der Abstand der beiden Knotenpunkte ist; um die Töne einer Scala zu geben, müssen also die Längen der Stäbe den Schwingungszahlen verkehrt proportional sein. Schwingende Stäbe, die nur am einen Ende befestigt werden, nehmen beim Schwingen die Form (Fig. 259 b) an, stellen also ein Viertel einer stehenden Welle dar; ihre Schwingungszahl ist demnach $n = \frac{4c}{l}$. Sie müssen daher ebenfalls eine den Schwingungszahlen verkehrt proportionale Länge besitzen, um die Töne einer Scala zu geben. Derartig schwingende Stäbe kommen in den Spieldosen in Anwendung.

Zu den transversal schwingenden Stäben gehört auch die Stimmgabel (Fig. 257). Wenn dieselbe durch einen Schlag gegen die Zinken in Schwingungen versetzt wird, so bilden sich in nächster Nähe der Krümmung die beiden Knotenpunkte. Der Stiel der Stimmgabel wird daher gezwungen, in der Richtung seiner Längsachse auf und nieder zu schwingen und setzt so das obere Brett des darunter befindlichen Holzkästchens in Bewegung. Ohne dieses Kästchen gibt die Stimmgabel einen sehr schwachen Ton, weil die von beiden Zinken ausgehenden Schwingungen entgegengesetzte Phasen haben und sich daher die Verdichtungen und Verdünnungen der Luft schon in der nächsten Umgebung der Stimmgabel wieder ausgleichen. In dem nur auf einer Seite offenen Holzkästchen wird aber die Luft nur in der Richtung gegen die Öffnung verschoben, und daher pflanzen sich in dieser Richtung die Schallwellen besonders kräftig fort.

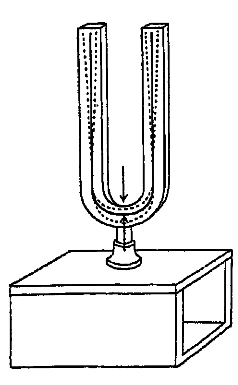


Fig. 257.

Schwingende Saiten. Die Schwingungen, welche eine zwischen zwei Punkten ausgespannte Saite ausführt, kann man sichtbar machen, indem man die schwingende Saite auf eine Wand proiciert und ihren Schatten nur in einem auf der Saite senkrechten und parallel zu sich fortbewegenden Schlitz sichtbar werden lässt; dann beschreibt der sichtbare Punkt eine fortschreitende Welle. Bei den „Streichinstrumenten" Violine, Viola, Cello und Bassgeige werden die Saiten durch Streichen mit dem „Bogen", bei der Harfe, Guitarre und Zither durch Zupfen, und beim Klaviere durch Anschlagen mit einem Hammer in Schwingungen versetzt.

Die Punkte, zwischen welchen die Saite ausgespannt ist, müssen Knotenpunkte werden, und ihr Abstand gibt uns, wenn kein anderer Knotenpunkt zwischen sie fällt, eine halbe Wellenlänge an. Es ist also $l = \frac{1}{2}\lambda = \frac{1}{2}c\,T$. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist $c = \sqrt{\frac{E}{d}}$, wobei E den auf die Querschnittseinheit entfallenden Zug darstellt und daher dem Ausdrucke $\frac{Pg}{q}$ entspricht, wo P die Masse des zur Spannung verwendeten Gewichtes, g die Beschleunigung der Schwerkraft, also Pg die spannende Kraft und $q = r^2\pi$

den Querschnitt der Saite bedeutet. Die Schwingungszahl ist mithin $n = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\,r\,l}\sqrt{\frac{P\,g}{\pi d}}$. Man muss also eine viermal größeres Gewicht P zur Spannung der Saite verwenden, um die doppelte Schwingungszahl oder die nächst höhere Octav zu erhalten. Spannen wir als Saiten zwei gleichstarke Drähte aus, von denen der eine aus Silber und der andere aus Aluminium besteht, so gibt bei derselben Spannkraft und gleicher Länge der silberne die nächst niedrigere Octav, also die halbe Schwingungszahl, weil die Dichte des Silbers sich zu der des Aluminiums, 10·6 : 2·7, nahezu wie 4 : 1 verhält. Dagegen ist die Tonhöhe dem Durchmesser, also auch dem Radius und der Länge der Saite verkehrt proportional.

Gewöhnlich werden die Saiten nicht durch Gewichte, sondern mit Hilfe eines „Schlüssels" durch die Kraft der Hand ausgespannt und durch Reibung festgehalten.

Wenn man ohne die Spannung zu ändern, die Länge der schwingenden Saite in der Weise reduciert, dass man einen zwischen den Endpunkten liegenden Punkt festhält, so steigt dadurch die Schwingungszahl im verkehrten Verhältnisse der Verkürzung; denn es ist

$$n : n' = \frac{1}{2\,r\,l}\sqrt{\frac{P\,g}{\pi d}} : \frac{1}{2\,r\,l'}\sqrt{\frac{P\,g}{\pi d}} = l' : l;$$

um also auf derselben Saite die Tonleiter zu spielen, müssen die Griffe so beschaffen sein, dass dadurch die Längen im Verhältnisse

$$\frac{8}{9},\ \frac{4}{5},\ \frac{3}{4},\ \frac{2}{3},\ \frac{3}{5},\ \frac{8}{15},\ \frac{1}{2}$$

verkürzt werden. Auch hier werden die Griffe nicht genau diesen Verhältniszahlen, sondern denen der gleichschwebenden Temperatur angepasst. Bei einer gespannten Saite können aber zwischen den Endpunkten auch noch andere Knotenpunkte auftreten. Wenn man die Saite in der Mitte auch nur leise berührt und in der Nähe des einen Endes mit dem Violinbogen streicht, so gerathen beide Hälften in Schwingungen, wie man sich durch aufgesetzte Papierreiterchen leicht überzeugen kann. In diesem Falle entspricht die Länge der Saite einer ganzen Wellenlänge, und demnach ist $l = \lambda = c\,.\,T = c\,\frac{1}{n}$, also $n = 2\,\frac{1}{2\,r\,l}\sqrt{\frac{P\,g}{\pi d}}$: die Schwingungszahl ist also doppelt so groß als früher, und die Saite gibt dann die nächst höhere Octav.

Berührt man die Saite beim ersten Drittel ihrer Länge, und streicht man sie mit dem Bogen innerhalb dieser Strecke, so bildet sich im Mittelpunkte der übrigen Strecke ohne weiteres Zuthun ein zweiter Knotenpunkt, und es wird $l = \frac{3}{2}\,\lambda = 3\,\frac{\lambda}{2} = 3\,.\,\frac{c\,T}{2}$ und $n = 3\,\frac{1}{2\,r\,l}\sqrt{\frac{P\,g}{\pi d}}$; wir erhalten so eine dreimal größere Schwingungszahl, also die Quint der Octav. Berührt man die Saite im ersten Viertel ihrer Länge, so theilt sie sich selbst in vier gleiche Theile, und wir erhalten eine viermal größere Schwingungszahl, also die zweithöhere Octav. So kann man der Reihe nach die den einzelnen Viel-

fachen der ersten Schwingungszahl entsprechenden Töne erzeugen, die man dann als die Obertöne des bei der ungetheilten Saite sich einstellenden Grundtones bezeichnet. Eine derartige Theilung der Saite tritt aber immer ein, wenn man sie unsymmetrisch in Schwingungen versetzt, und daher bleiben einzelne Obertöne nur aus, wenn man ihre Schwingungen dort verhindert, wo sich Schwingungsbäuche einstellen würden. Die Obertöne treten meist mit sehr verschiedener Stärke auf; ihre Auswahl ist für die Klangfarbe des Tones entscheidend. Der Ton, den eine Saite gibt, klingt daher bei derselben Spannung ganz anders, wenn man sie an verschiedenen Stellen zupft oder streicht, weil in diesen Fällen die verschiedenen Obertöne größere oder geringere Stärke annehmen oder ganz verschwinden.

Die Pfeifen. Um in der Luft stehende Wellen hervorzurufen, müssen sich zwei fortschreitende Wellen kreuzen, und dies erreicht man am besten, indem man am einen Ende einer Röhre eine Welle erregt, die dann am anderen Ende reflectiert wird. Das „Mundstück“ und der röhrenförmige „Schaft“ bilden daher die Hauptbestandtheile der Pfeife.

Bei der Labial- oder Lippenpfeife (Fig. 258) strömt die Luft zunächst in den Fuß der Pfeife F und wird von hier aus zwischen Kern K und Unterlippe U hindurch gegen die scharfkantige Oberlippe O getrieben. Dieser Luftstrom macht das zwischen der äußeren und inneren Luft bestehende Gleichgewicht viel stabiler, denn jede Verdünnung im Innern des Pfeifenschaftes zieht den Luftstrom hinein und bringt daselbst eine Verdichtung hervor, die den Luftstrom rasch wieder nach außen drängt. Andererseits übt der bei der Oberlippe hervortretende Luftstrahl auf den Innenraum eine saugende Wirkung aus, und die Verdünnung, die dadurch in der Pfeife entsteht, zieht den Luftstrom wieder hinein. Die erste, in das Innere der Pfeife dringende Verdichtung oder Verdünnung pflanzt sich aber bis zum anderen Ende fort und wird dort reflectiert, gleichviel, ob die Pfeife „offen“ oder „gedeckt“ ist. Im ersteren Falle kehrt die reflectierte Welle mit derselben Phase in die Pfeife zurück, im zweiten Falle mit der entgegengesetzten. War also in einem bestimmten Augenblicke am Munde der Pfeife eine Verdichtung vorhanden, so wird dieselbe nach einer bestimmten Zeit wieder dahin zurückkehren, und daher hängt der Wechsel der Verdichtungen von der Länge des Weges ab, den die Welle in der Pfeife zurücklegt.

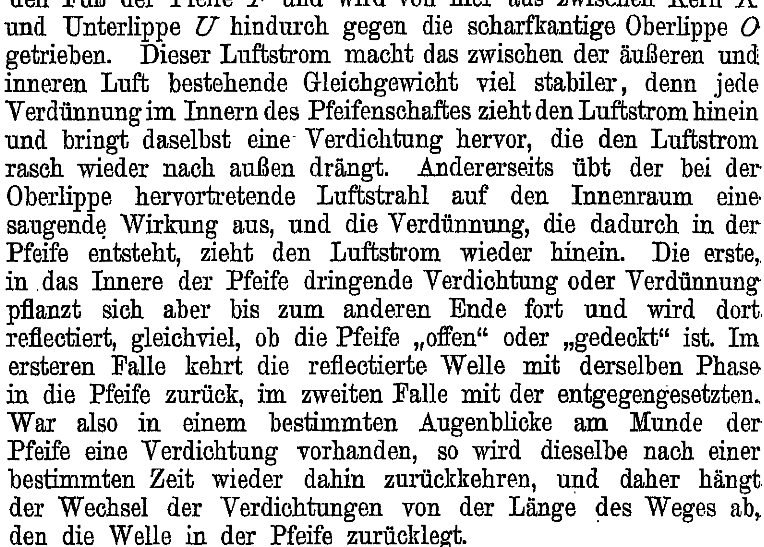


Fig. 258.

Bei der gedeckten Pfeife tritt am verschlossenen Ende eine Reflexion mit Phasenverschiebung ein. Es muss also hier ein Knotenpunkt auftreten, während beim Munde der Pfeife die Verschiebungen der Luft am stärksten sind. Bedeutet in Fig. 259 M die Stellung des Mundes und E die des anderen Endes, so stellt a die Stärke der Verschiebung und b die Stärke der Verdichtung und Verdünnung in der Pfeife dar. Diese Schwingungsform entspricht einer Viertelwelle, und demnach ist $l = \frac{1}{4}\lambda = \frac{1}{4} c T = \frac{1}{4}\frac{c}{n}$. Die absolute Tonhöhe ist also $n = \frac{c}{4l}$, wobei $c = 33200 \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$ und die Länge l der Pfeife in cm ausgedrückt wird.

Es kann sich aber auch eine Wellenbewegung ausbilden (Fig. 259 *c*, *d*), bei der die Länge der Pfeife $\frac{3}{4}$ Wellenlängen umfasst. In diesem Falle ist aber $l = \frac{3}{4} c T = \frac{3}{4} \frac{c}{n}$ und daher die Schwingungszahl dieses neuen Tones $n = \frac{3}{4} \frac{c}{l}$; daher wird bei stärkerem Anblasen die Quint der Octav hörbar.

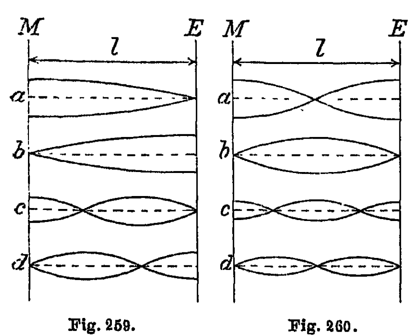


Fig. 259. Fig. 260.

Abgesehen von dieser Erhöhung des Tones durch stärkeres Anblasen hängt die Tonhöhe nur von der Länge der Pfeife ab und ihre Schwingungszahl ist dieser verkehrt proportional. Die Längen der eine Scala gebenden Pfeifen stehen also zueinander wieder im gleichen Verhältnis, wie die reciproken Werte der relativen Tonhöhen. Bei einer offenen Pfeife ist die Reflexion am offenen Ende nicht mit einer Phasenverschiebung verbunden, und daher tritt in diesem Falle der Knotenpunkt nicht am Ende der Pfeife auf, sondern in der Mitte. Fig. 260*a* stellt den Bewegungszustand in der offenen Pfeife dar, und zwar hinsichtlich der Verschiebungen und bei *b* für die Verdichtungen. Beim Auftreten des Grundtones umfasst daher die Schwingung eine halbe Wellenlänge, und es ist $l = \frac{1}{2} \lambda = \frac{1}{2} c T = \frac{1}{2} \frac{c}{n}$, mithin $n = \frac{1}{2} \frac{c}{l}$, während der Grundton der gedeckten Pfeife die Schwingungszahl $n = \frac{1}{4} \frac{c}{l}$ besitzt, also die nächst tiefere Octav gibt.

Bei stärkerem Anblasen gibt auch die offene Pfeife den höheren Ton (Fig. 260 *c* und *d*) der eine ganze Wellenlänge umfasst, und daher ist $l = \lambda = c T = \frac{c}{n}$ also $n = \frac{c}{l}$; wir erhalten also die höhere Octav

Offene Pfeifen, deren Grundtöne eine Scala bilden, müssen ihrer Länge nach wieder den Schwingungsverhältnissen der relativen Tonhöhen entsprechen, wobei allerdings zu beachten ist, dass bei den offenen Pfeifen das Ende nicht genau für die Berechnung der Tonhöhe maßgebend ist.

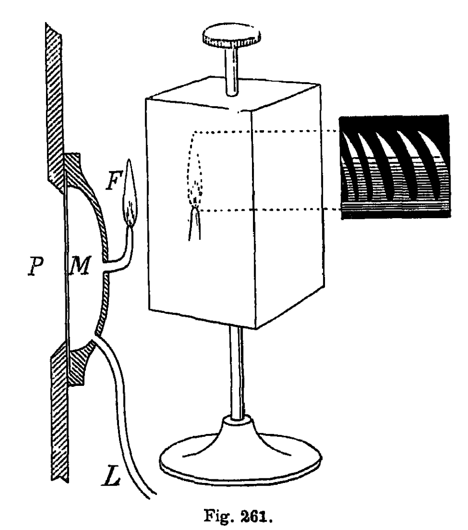


Fig. 261.

Die Verdichtungen und Verdünnungen, welche mit den Luftschwingungen in der Pfeife verbunden sind, lassen sich auch mit Hilfe von Königs manometrischer Kapsel nachweisen (Fig. 261). Der Hohlraum derselben ist vom Raume *P*, in dem die Luftschwingungen auftreten, nur durch eine biegsame Membrane *M* getrennt, die sich bei jeder Verdichtung nach innen und bei einer Verdünnung nach außen wölbt. Fließt also Leuchtgas durch die Kapsel, so wird dieses im ersteren Falle unter erhöhtem Druck, im letzteren Falle unter vermindertem

Druck in die Luft ausströmen, und die Flamme F im gleichen Rhythmus bald höher, bald tiefer brennen. Diese dem unbewaffneten Auge wegen der Geschwindigkeit des Wechsels kaum wahrnehmbaren Schwankungen können im rotierenden Spiegel leicht beobachtet werden (Fig. 261). Dabei zeigt sich auch, dass manche Töne nicht aus einfachen und vollständig gleichartigen Schwingungen bestehen, sondern dass größere Complexe von verschiedenartigen Schwingungen periodisch wiederkehren. Je nachdem man die manometrische Kapsel an der Stelle anbringt, wo sich in der Pfeife ein Knotenpunkt einstellt oder nicht, wird man also mit Hilfe derselben mehr oder weniger starke Druckveränderungen wahrnehmen.

Aus der Tonhöhe lässt sich auch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in verschiedenen Gasen bestimmen. Wenn man z. B. eine gedeckte Pfeife mit Leuchtgas füllt, so ändert sich sofort der Ton der Pfeife sehr deutlich. Nach der Formel $c = \sqrt{k \frac{P}{d} (1 + \alpha t)}$ kann man die Höhe eines Pfeifentones auch dazu benützen, um das Verhältnis k der specifischen Wärmen bei constantem Druck und Volumen für die Luft, wie auch für andere Gase zu finden.

Bei den Zungenpfeifen werden die Luftschwingungen in der Pfeife durch die Schwingungen einer elastischen Lamelle hervorgerufen, deren Länge und Stärke die Höhe des Tones bedingt. Man verwendet theils „aufschlagende" (Fig. 262 a), theils „durchschlagende Zungen" (Fig. 262 b). Erstere geben einen scharfen schnarrenden Ton, wie er bei den Bässen der Orgeln verwendet wird, letztere haben einen viel weicheren Ton. Der mit dem Mundstück der Zungenpfeife verbundene Schaft der Pfeife kann verschiedene Obertöne mehr oder weniger hervortreten lassen, und damit ändert sich die Klangfarbe des Pfeifentones.

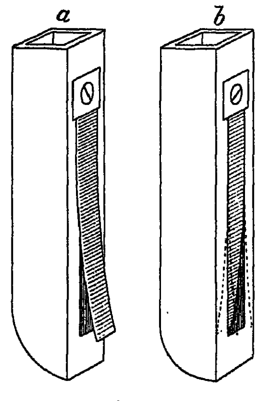


Fig. 262.

Von den Blasinstrumenten sind die Hirtenpfeife, die Flöte und das Piccolo offene Lippenpfeifen. Der Ton entsteht dadurch, dass man gegen die scharfe Kante am Mundstück des Instrumentes bläst; für dessen Höhe ist jener Theil des Instrumentes maßgebend, der zwischen dem Mundstück und der ersten nicht verschlossenen Öffnung liegt. Die Clarinette und ähnliche Instrumente sind Zungenpfeifen; das Mundstück besteht aus einem oder zwei Rohrblättern, die in den Mund genommen werden und beim Anblasen wie die Zinken einer Stimmgabel gegeneinanderschwingen. Bei den unzähligen Formen der Blechinstrumente der sogenannten „türkischen Musik" hat das Mundstück die Gestalt einer Halbkugel, die an die Lippen des Bläsers gedrückt wird. Letztere bilden die vibrierenden Zungen, und die von ihnen ausgehenden Luftschwingungen werden dann durch das angesetzte Röhrensystem in mannigfacher Weise modificiert.

Die „Königin der Instrumente" ist die Orgel; sie enthält theils Lippen-, theils Zungenpfeifen. Die Wirkung der letzteren wird durch die verschieden gestalteten Schallbecher so verändert, dass damit die meisten gebräuchlichen Musikinstrumente einigermaßen nachgeahmt werden können. Die Construction von Orgeln reicht in ihren primitivsten Formen bis in die vorchristliche Zeit zurück, wurde aber durch ihre Bestimmung zum Specialinstrument für kirchliche Musik schon seit mehreren Jahrhunderten zum Gegenstande einer eigenen Industrie, welche viele und schwierige Probleme der Akustik schon längst auf experimentellem Wege gelöst hat.

Die Resonanz. Wenn wir gegen eine größere, an einem Faden aufgehängte Metallkugel einen schwachen Luftstrom blasen, so vermögen wir dieselbe kaum aus ihrer Lage zu verschieben. Wenn wir aber den Luftstrom stoßweise im Rhythmus der Pendelschwingungen auf die Kugel wirken lassen, so addieren sich die Verschiebungsarbeiten, und daher nimmt die Amplitude der Schwingungen immer mehr zu. Zum Läuten sehr großer Glocken reichen relativ geringe Kräfte hin, wenn der Zug am Seile immer im Sinne der Schwingung und in denselben Intervallen erfolgt.

In ähnlicher Weise vermögen auch die Luftwellen, obwohl sie nur eine geringe Arbeitskraft besitzen, die Zinken einer Stimmgabel in Schwingungen zu versetzen, wenn sie mit derselben Schwingungszahl erfolgen. Wir stellen zwei Stimmgabeln, welche genau denselben Ton geben, sehr nahe einander gegenüber, dass sich die Resonanzkästen die offenen Wände zukehren. Wenn man hierauf bei der einen kräftige Schwingungen hervorruft und sie dann kräftig mit der Hand fassend, rasch zum Schweigen bringt, so hört man die zweite Stimmgabel forttönen. Da die zarten Luftschwingungen mehrere hundertmal in jeder Secunde die Zinken so verschieben, wie es ihre Schwingungszahl verlangt, so nehmen diese endlich an der Bewegung theil, und dieses Mittönen bezeichnet man als R e s o n a n z. Ein in das offene Clavier hineingesungener Ton bringt alle Saiten zum Mittönen, die auf denselben Ton oder einen der miterklingenden Obertöne abgestimmt sind. Ein Trinkglas kann durch Hineinschreien „seines Tones" gesprengt werden. Auch die in jedem Gefäße eingeschlossene Luft reagiert nur auf die Schwingungen eines einzigen Tones, und daher dringt durch einen solchen Luftbehälter hindurch nur jener Ton an das Ohr, der die in demselben enthaltene Luft durch Resonanz zum Mitschweigen bringt. Auf dieser Erscheinung beruhen die von H e r m a n n von H e l m h o l t z im Jahre 1863 erfundenen Resonatoren (Fig. 263).

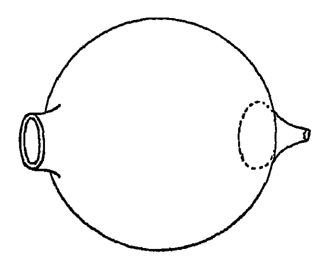


Fig. 263.

Hält man einen solchen Resonator mit der engeren Öffnung an das Ohr, so ist die in ihm enthaltene Luft vor allen anderen Schwingungen geschützt, die zufällig in der Umgebung erregt werden und betheiligt sich nur an Schwingungen, die ihren eigenen Elasticitätsverhältnissen und Dimensionen entsprechen; aber auch diese Töne kommen nur dann zustande wenn sie durch die weitere Öffnung von außen erregt werden. Hat man einen Satz von Resonatoren, die auf alle einem Grundton angehörigen Obertöne abgestimmt sind, so lassen sich diejenigen Obertöne ermitteln, die diesen Grundton begleiten. Statt die Resonatoren der Reihe nach an das Ohr zu halten, kann man sie auch mit ebensovielen manometrischen Kapseln verbinden und dieselben im rotierenden Spiegel gleichzeitig beobachten.

Die Klangfarbe. Wenn wir einen Ton von bestimmter Höhe mit verschiedenen Instrumenten hervorbringen, so erhalten wir dennoch einen ganz verschiedenen Eindruck, den wir der K l a n g f a r b e zuschreiben. Fast bei jedem Schallerreger treten nämlich nebst dem Grundton noch mehrere Obertöne auf, aber nicht mit derselben Stärke. Die für ein Instrument charakteristische Auswahl dieser Obertöne bedingt seine Klangfarbe.

Eine der Verschiedenheit der Klangfarbe verwandte Erscheinung ist die **Articulierung** der Sprachlaute und insbesonders der **Vocale**. Obwohl beim Gesange die einzelnen Vocale in den verschiedensten Tonlagen vorkommen, so sind doch für jeden derselben Töne von ganz bestimmter Höhe sehr wesentlich. Diese für den Klang des Vocales charakteristischen Töne sind beim U das f mit 174, beim O das $\overline{b}$ mit 461, beim A das $\overline{\overline{b}}$ mit 922, beim E das $\overline{f}$ mit 348 und das $\overline{\overline{\overline{b}}}$ mit 1844 und endlich beim I das f mit 174 und das $\overline{\overline{\overline{\overline{d}}}}$ mit 2348 Schwingungen. Viel complicierter gestaltet sich die Analyse der Consonanten.

Der Phonograph. Der Gebrauch des elektrischen Telegraphen setzt sowohl die Kenntnis der entsprechenden Signale oder die Übertragung dieser Schrift in die allgemein üblichen Schriftzeichen voraus, während beim Gebrauche des Telephons beides überflüssig wird. Dieser Umstand legt den Gedanken nahe, die bei der Aussprache eines Wortes erregten Schallschwingungen ebenfalls zu einer reproducierbaren Fixierung zu benützen, und diesen Zweck hat Edison im Jahre 1877 durch die Erfindung des Phonographen wenigstens innerhalb gewisser Grenzen erreicht. Auf einer Walze, deren Achse als Schraubenspindel in einem schraubenförmigen Lager läuft, ist ein Stanniolblatt ausgespannt, das sich mit der Walze dreht und zugleich in der Richtung der Achse fortbewegt. Die durch die Sprache erregten Luftschwingungen werden durch einen Schalltrichter gesammelt und versetzen ein dünnes Glimmerblättchen in Schwingungen, die ein am Blättchen befestigter Stift in den darunter rotierenden Stanniolstreifen eingräbt. Gleitet dieser Stift ein zweites Mal über die so entstandenen Vertiefungen und Erhebungen hinweg, so macht das Glimmerblättchen ein zweites Mal dieselben Schwingungen. Bringt man vor demselben einen größeren kegelförmigen Schalltrichter an, der die Zerstreuung der Luftschwingungen wirksam verhindert, so kann man die früher gesprochenen Worte ein zweites Mal hörbar machen. Die auf der Walze hervorgebrachten Vertiefungen lassen sich galvanoplastisch oder durch Abguss vervielfältigen und dann mit Hilfe des **Grammophon** beliebig oft wiederholen. Auch die telephonischen Lautübertragungen lassen sich auf ähnlichem Wege fixieren und nach einiger Zeit wieder hervorrufen. Es ist sogar gelungen, die Schwingungsformen auf magnetischem Wege festzuhalten, indem man im Telephon statt der Platte weichen Eisens einen Stahlstreifen am Magneten des Telephons vorüberziehen lässt, der dann an verschiedenen Stellen mehr oder weniger stark magnetisiert, in einem zweiten Telephon analoge Schwingungen zu erregen vermag. Sehr gute Phonographen bringen nicht nur den Inhalt, sondern auch die Klangfarbe der Sprache gut zum Ausdrucke.

Das Sprachorgan. Schon das bisher über Analyse der Sprache Gesagte deutet darauf hin, dass dem menschlichen Geiste zum Ausdrucke seiner Gedanken ein Organismus zur Verfügung steht, der auch die kunstreichsten Apparate an Leistungsfähigkeit weit übertrifft, indem er willkürlich und sinngemäß das endlos ausgedehnte Wellenspiel der Sprachlaute durch seine Articulierung beherrscht. Das äußere Gerüste des Sprachorganes bildet der muskulöse Kehlkopf, welcher die beiden Stimmbänder enthält; diese lassen im schlaffen Zustande der durchziehenden Luft eine breite Spalte frei, können aber ganz willkürlich mehr oder weniger stark gespannt werden, um so einen ganz bestimmten Ton hervorzurufen. Mund-, Rachen- und Nasenhöhle, sowie auch Zunge und Zähne gestatten endlich die von den Stimmbändern ausgehenden Luftwellen in der mannigfachsten Weise zu modulieren, indem sie diesen oder jenen Oberton heben oder unterdrücken, während die Lungenthätigkeit für einen passend regulierten Luftstrom sorgt. Bei Kinderstimmen wurden schon Stimmhöhen bis zu 2500—3000 Schwingungen nachgewiesen. Ein Bassist im 18. Jahrhundert sang mit voller und klarer Stimme das 5fach gestrichene f mit 43 Schwingungen, und der berühmte Tonkünstler Mozart bezeugt, dass eine Sängerin in Parma das 6fach

gestrichene *c* mit 2048 Schwingungen erreichte, während sie andererseits bis zum *g* mit 192 Schwingungen hinabsang, also über ein Stimmgebiet von $4^1/_2$ Octaven verfügte.

Das Ohr. Der Leichtigkeit, mit der sich das Sprachorgan dem Fluge der Gedanken folgend, im Reiche der Töne bewegt, entspricht andererseits der auf die Wahrnehmung der leisesten Lautverschiedenheiten berechnete Bau des menschlichen Gehörorganes. Seine Empfindlichkeit ist nach Lord Rayleighs Untersuchungen so groß, dass es noch Schallwellen zu vernehmen vermag, deren Amplitude kaum ein Milliontel Millimeter beträgt, und die Energie einer kleinen Calorie würde nach Pellats Berechnungen hinreichen, um in einem guten Telephon 10000 Jahre lang einen hörbaren Ton zu erzeugen. Dieser enormen Empfindlichkeit steht ein hochentwickeltes Analysierungsvermögen ebenbürtig zur Seite, denn diese Empfindlichkeit bezieht sich nicht nur auf die Gesammtintensität des Schalles, sondern auf eine ganze Reihe gleichzeitig auftretender Grund- und Obertöne. Die untere Grenze der Hörbarkeit eines Tones ist wie die obere individuell verschieden. Das eine Ohr vermag Schallwellen noch als Ton aufzufassen, den ein anderes keineswegs schwerhöriges Ohr nicht mehr hört. Als untere Grenze der Hörbarkeit werden 12 Schwingungen angegeben, die obere Grenze schwankt zwischen 12000—32000 Schwingungen. Man kann dieselbe für ein einzelnes Ohr in der Weise feststellen, dass man mit Hilfe der von Edelmann verbesserten Galtonpfeife Töne hervorruft, deren Höhe sich durch genaue Einstellung zweier Mikrometerschrauben feststellen lässt. Die in der Musik verwendeten Töne liegen, wenn man von den Obertönen absieht, zwischen 16 und 4000 Schwingungen.

Das Gehörorgan (Fig. 264) besteht aus dem „äußeren Ohr", zu dem man die Ohrmuschel und den Gehörgang rechnet, der mit dem „Trommelfell" abschließt, dann folgt das „mittlere Ohr", welches die Paukenhöhle umfasst, in der sich die Gehörknöchelchen befinden und die durch die „eustachische Röhre" mit Mund und Nase in Verbindung steht, und noch tiefer in die Schädelknochen gebettet, liegt das „innere Ohr". Von den Gehörknöchelchen ist der „Hammer" mit dem Stiele fast in der Mitte des Trommelfelles angewachsen, außerdem sitzt er noch am Rande desselben fest, ferner ist er durch einen Fortsatz mit der Innenwand der Paukenhöhle fest verbunden und endlich ruht er als Kugelgelenk in der Höhlung des „Ambos". Auch der Ambos findet mit dem einen seiner Ausläufer einen Stützpunkt in der Paukenhöhle, während ein anderer Vorsprung durch das „Linsenkörperchen" oder „sylvische Bein" mit dem „Steigbügel" verwachsen ist. Da der Hammer an zwei Stellen mit der Paukenhöhle fest verbunden ist und außerdem noch das Trommelfell mit dem Ambos verknüpft, so ist damit eine feste, wenn auch sehr elastische Verbindung zwischen dem Trommelfell und dem Steig-

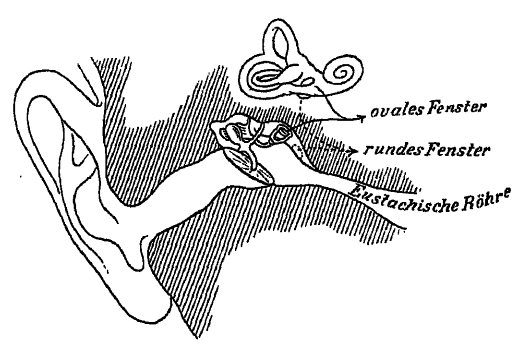


Fig. 264.

bügel hergestellt, welche durch zwei mit dem Ambos verwachsene Muskeln mehr oder weniger versteift werden kann. Der Steigbügel umfasst rahmenartig das „ovale Fenster“; durch eine Membrane, welche das Fenster verschließt, gelangen die in die Paukenhöhle eindringenden Luftwellen durch Brechung zu den flüssigen Bestandtheilen des inneren Ohres und pflanzen sich durch dieselben bis zum Gehörnerven fort. Das innere Ohr steht außerdem noch durch das „runde Fenster“ mit der Paukenhöhle in Verbindung, und daher können die Schallwellen auch auf diesem Wege auf den Gehörnerven wirken. Die mit so feinen und empfindlichen Organismen ausgestattete Paukenhöhle steht nur auf dem Umwege durch die eustachische Röhre mit der äußeren Luft in Verbindung und ist durch das Trommelfell dem gefährlichen Einflusse der Atmosphäre entzogen. Die aus größerer Entfernung kommenden Schallwellen dringen durch Mund und Nase ebenso rasch in die Paukenhöhle wie in den Gehörgang, weshalb das Trommelfell von diesen Schallwellen nicht in Schwingungen versetzt wird. Nur wenn aus unmittelbarer Nähe kräftige Wellen in den Gehörgang dringen, so tritt das Knöchelsystem in Thätigkeit, um die Empfindlichkeit des Ohres passend zu regulieren, dass die durch das Trommelfell eingedrungenen Schwingungen richtig empfunden werden. Das innere Ohr enthält noch die drei halbkreisförmigen Bögen, das sogenannte „Labyrinth“ und die „Schnecke“ mit den Cortischen Fasern, etwa 3000 an der Zahl, von welchen nur diejenigen den Gehörnerven zu Empfindungen reizen, die nach dem Gesetze der Resonanz zum Mittönen veranlasst werden.

---o---

Optik.

Die Schwingungen, die ein tönender Körper ausführt, kann man nicht nur mit Hilfe geeigneter Apparate leicht sichtbar machen, sondern sie sind oft schon mit dem freien Auge oder durch den Tastsinn deutlich wahrnehmbar. Dabei lassen sich alle für die Wellenbewegung charakteristischen Erscheinungen nachweisen, nämlich die Reflexion, die Brechung, die Interferenz- und die Beugungserscheinungen. Die Brechbarkeit tritt nur deshalb mehr in den Hintergrund, weil die Schallwellen fast ausnahmslos auf ein einziges Medium, nämlich auf die Luft angewiesen sind. Die Wellenbewegung, auf welche die Lichtwirkungen zurückgeführt werden, entzieht sich dagegen vollständig der directen Beobachtung, aber die oben genannten charakteristischen Erscheinungen treten mit solcher Schärfe hervor, dass die „Undulationstheorie“ alle anderen Erklärungsversuche verdrängt hat. Wir werden uns zunächst mit jenen Erscheinungen befassen, für welche es vollständig gleichgiltig ist, ob wir das Licht als eine Wellenbewegung betrachten oder nicht. Erst in der „physikalischen Optik“ werden wir dann der Frage nähertreten, warum und wie die verschiedenen Lichterscheinungen nach der Wellentheorie erklärt werden können.

Photometrie.

Eine der auffallendsten optischen Erscheinungen ist der Unterschied zwischen „hell“ und „dunkel“. Wie wir uns in der Wärmelehre zuerst eine genaue Messvorrichtung für Temperaturdifferenzen verschafft haben, die der Tastsinn nicht in verlässlicher Weise anzugeben vermag, so wollen wir hier zunächst die Helligkeitsunterschiede messend verfolgen, und damit befasst sich eben die Photometrie.

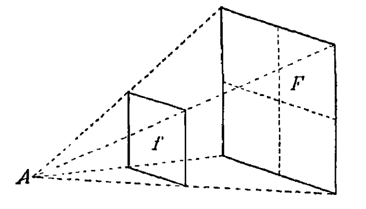


Fig. 265.

Befindet sich in A (Fig. 265) eine Lichtquelle, so stellt sich hinter dem undurchsichtigen Schirme f ein Schatten ein, dessen Querschnitt mit zunehmender Entfernung vom Lichtpunkt A immer größer wird. In der doppelten Entfernung wird er gleich F, also aus geometrischen Gründen viermal so groß sein als f. Daher empfängt auch ein viermal größerer Schirm F, von den Lichtstrahlen getroffen, die gleiche Lichtmenge wie f, und es entfällt also in der doppelten Entfernung auf dieselbe Fläche eine viermal kleinere Lichtmenge. Die Helligkeit ist mithin dem Quadrate des Abstandes von der Lichtquelle verkehrt proportional. Auf diesem Gesetze beruht sowohl die Vergleichung ver-

schiedener Helligkeitsstufen, wie auch die Messung der Leuchtkraft ve schiedener Lichtquellen.

Beim Photometer von Ritchie (Fig. 266) werden die weiß ang strichenen Seitenflächen AB und AC eines dreiseitigen Prismas ABC vo zwei verschiedenen Lichtquellen beleuchtet. Wenn die Helligkeit beid Flächen die gleiche ist, werden wir von O aus die Grenzlinie A kaum b merken. So überzeugen wir uns, dass vier Kerzen in der doppelten En fernung dieselbe Helligkeit hervorrufen, wie eine einzige Kerze in der ei fachen Entfernung. Gibt eine Gasflamme in der vierfachen Entfernun ebenfalls dieselbe Helligkeit, so werden wir ihr die Leuchtkraft von 1 Kerzen zuschreiben.

Um der Intensität einer Lichtquelle eine Maßzahl zuordnen zu könne müssen wir zuerst für die Leuchtkraft eine Einheit feststellen. Als solch benützt man entweder die deutsche Normal-Paraffinkerze, welch nach genauen Vorschriften hergestellt wird, die englische Spermaze kerze oder die Flamme der mit Amylacetat gefüllten Hefnerlamp wenn sie 4 cm hoch ist. Violle hat die Leuchtkraft eines cm² wei glühenden Platins vorgeschlagen, wenn dasselbe im Begriffe ist, zu schmelze

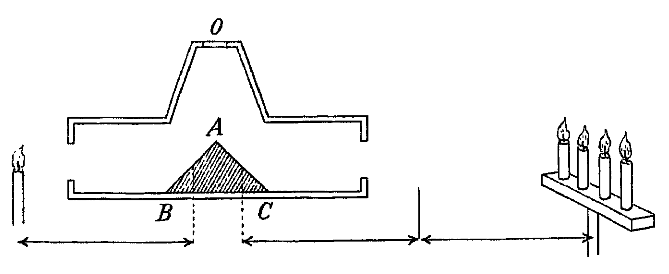


Fig. 266.

Das Verhältnis dieser Einheiten ergibt sich aus folgenden Zahlen 1 Violle-Einheit = 16·4 deutsche Normalkerzen = 18·5 englische Kerzen = 18· Hefner-Kerzen (*H. K.*).

Die vielfach verbreiteten Petroleumflachbrenner haben eine Leuch kraft von 5—7 *H. K.*; die Petroleum-Rundbrenner etwa 9, die Ga Schmetterlingsbrenner 14—16, die Gas-Argandbrenner 28, die Acetyle Zweilochbrenner 60 und das Gas-Glühlicht oder die Auerbrenner circa 80 *H. K*

Um den Lichtverbrauch behufs Kostenberechnung zu messen, ge man von der „Kerzenstunde“ (*K. St.*) als Einheit aus und setzt dann f dieselbe einen bestimmten Preis fest. Der Lichtconsum lässt sich einfac in der Weise berechnen, dass man die Zahl der Hefner-Kerzen, welch dieselbe Leuchtkraft entwickeln, mit der in Stunden ausgedrückten Bren dauer multipliciert.

Als Einheit der „Helligkeit“ verwendet man die Helligkeit einer mat weißen Fläche, welche einen Meter von der Einheit der Lichtstärke, al z. B. von der brennenden Hefnerlampe entfernt ist, und bezeichnet sie a eine „Meterkerze“.

Genaue Messungen von Lichtstärken müssen in der „Photomete kammer“, also in einem Raume vorgenommen werden, in den kein fremd Licht einzudringen vermag, und dessen Wände mattschwarz angestriche sind, damit jede Reflexwirkung vermieden wird. Um die von zwei Lich quellen l und L stammenden Helligkeitsgrade miteinander zu vergleiche

lässt man nach **Rumford** die von ihnen hervorgerufenen Schatten eines Stabes unmittelbar nebeneinanderfallen, und verschiebt den Stab oder die beiden Lichtquellen solange, bis man keinen Helligkeitsunterschied wahrzunehmen vermag. Der von der Lichtquelle l stammende Schattenraum wird nämlich nur von der Lichtquelle L und der von der letzteren stammende Schatten nur von der ersteren beleuchtet; diese beiden Schattenflächen müssen also genau dieselbe Helligkeit zeigen. Beim Photometer von Bunsen (1857) stellt man die Lichtquellen zu beiden Seiten einer durchscheinenden Papierscheibe auf, die in der Mitte einen Fettfleck besitzt. Da nämlich das Papier an fetten Stellen für das Licht durchlässiger ist, als an den übrigen, so erscheint diese Stelle im auffallenden und reflectierten Lichte dunkler, im durchfallenden Lichte dagegen heller. Wird eine solche Papierscheibe von beiden Seiten gleich stark beleuchtet, so darf der Fettfleck weder heller noch dunkler erscheinen und muß also verschwinden. Wenn wir die Distanzen beider Lichtquellen l und L von der Papierfläche auf der Photometerbank abmessen, so besteht zwischen den Entfernungen l_1 und l_2 der Lichtquellen und ihren Intensitäten i_1 und i_2 die Proportion $i_1 : i_2 = l_1^2 : l_2^2$, da eine Lichtquelle viermal stärker sein muss, um in der doppelten Entfernung dieselbe Helligkeit zu verbreiten. Gewöhnlich werden die beiden Lichtquellen an den Endpunkten einer Photometerbank von der Länge l befestiget und die Papierscheibe wird zwischen ihnen verschoben, bis der Fettfleck verschwindet. Dadurch wird die Photometerbank in zwei Stücke l_1 und l_2 getheilt, und man findet an den verschiedenen Stellen bereits das Verhältnis $v = \left(\frac{l_1}{l_2}\right)^2$ angegeben, für welches der obigen Proportion zufolge die Gleichung besteht $i_1 = \left(\frac{l_1}{l_2}\right)^2 . i_2 = v . i_2$. Ist für eine dritte Lichtquelle $i'_1 = v' . i_2$, so folgt hieraus, dass $i'_1 = \frac{v'}{v} i_1$.

Geometrische Optik.

Die geradlinige Fortpflanzung ist für das Licht so charakteristisch, dass man deswegen die von einem Punkte ausgehenden Geraden auch in der Geometrie als „Strahlen" bezeichnet. Auf der geradlinigen

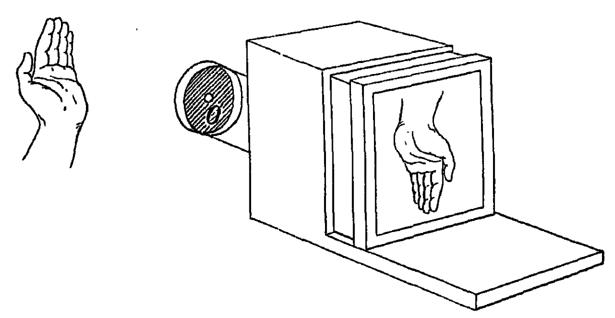


Fig. 267.

Fortpflanzung beruht die Entstehung der Bilder in der sogenannten „Camera obscura" (Fig. 267). Da nämlich die von jedem Punkte des Gegenstandes ausgehenden Strahlen, welche durch eine punktförmige Öffnung O gehen,

ihrer Lage nach vollkommen bestimmt sind, so ist damit auch ihr Durchschnittspunkt mit einer Ebene gegeben, und wir erhalten daher auf derselben durch centrische Projection ein umgekehrtes Bild. War der abgebildete Gegenstand die linke Hand, so zeigt uns das vom Punkte O aus betrachtete Bild im Innern der Camera die rechte Hand; ist die Wand transparent, so sehen wir außerhalb der Camera wieder die linke Hand, weil jedes Transparent auf verschiedenen Seiten symmetrische Figuren zeigt, und eine zweimalige symmetrische Abbildung wieder zu einstimmiger Ähnlichkeit führt. Das Bild wird schärfer, wenn wir die Öffnung O kleiner wählen; damit nimmt aber auch die Lichtstärke des Bildes ab; wenn wir dagegen eine größere Öffnung wählen, so wird das Bild heller, aber verwaschen, weil jeder Punkt des Gegenstandes durch eine Fläche abgebildet wird und diese Flächen sich theilweise überdecken. Die Größe des Bildes ist der Entfernung proportional und im gleichen Maße lichtschwächer, je größer es wird.

Reflexion (Katoptrik).

Ebene Spiegel. Legen wir auf den von der Sonne oder einer anderen kräftigen Lichtquelle L beleuchteten Tisch einen ebenen Spiegel, so bemerken wir an irgend einer Stelle des Zimmers einen Lichtreflex, der ungefähr die Form des Spiegels hat. Wenn wir die vom Spiegel gegen die Wand geworfenen Strahlen nach rückwärts verlängern, so schneiden sie sich in einem Punkte L' (Fig. 268), der zur Lichtquelle L bezüglich der Ebene

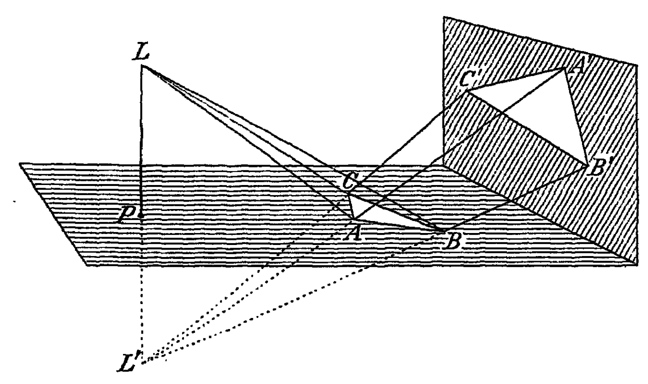


Fig. 268.

des Spiegels symmetrisch liegt. Ersetzen wir den Spiegel durch ein congruentes Stück aus glänzendem weißem Papier, so beobachten wir an derselben Stelle wie früher einen Reflex, dessen Umrisse aber nicht mehr scharf, sondern sehr verwaschen sind. In diesem Falle bezeichnet man die Reflexion als eine *diffuse*. Die Ursache dieser Erscheinung liegt darin, dass nicht alle reflectierenden Theile der Papieroberfläche genau in dieselbe Ebene fallen und daher die einzelnen Lichtstrahlen nach verschiedenen Richtungen zurückgeworfen werden. Die für den Hausgebrauch bestimmten Spiegel reflectieren das Licht sowohl an der vorderen, wie auch an der hinteren mit Amalgam belegten Oberfläche des Glases und sind daher für optische Zwecke nicht gut brauchbar.

Fällt ein Lichtstrahl in der Richtung RO auf die ebene Fläche des Glaskörpers K der „optischen Scheibe" (Fig. 269), so theilt er sich hier in einen „gebrochenen" und einen „reflectierten Strahl" OR'. Letzterer schließt

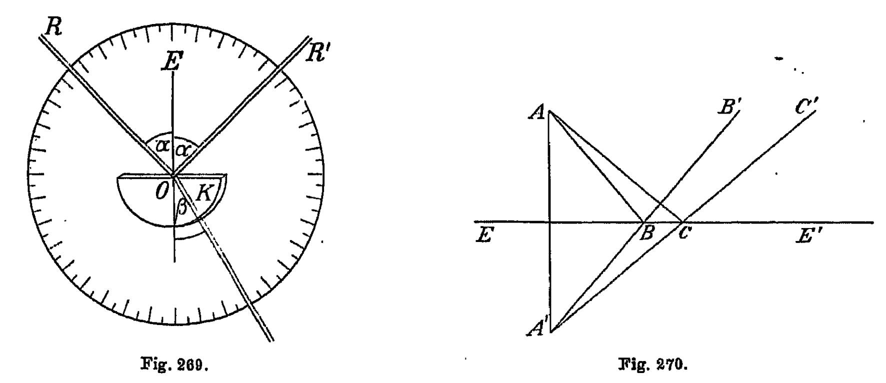


Fig. 269. Fig. 270.

mit dem Einfallslothe OE denselben Winkel ein, wie der Strahl RO. Es gilt also auch für die Lichtstrahlen das Reflexionsgesetz: **Der Einfallswinkel ist gleich dem Reflexionswinkel.**

Um den Weg des von A (Fig. 270) ausgehenden und nach einem Punkte B' reflectierten Strahles zu finden, construiert man den zu EE, symmetrischen Punkt A', verbindet dann den Punkt B' mit A' und erhält so die Stelle B, an der die Reflexion stattfindet. Die Reflexion an ebenen Spiegeln findet besonders in den folgenden Fällen praktische Verwendung.

Der rotierende Spiegel reflectiert den Strahl LO (Fig. 271) in der Weise, dass sich der reflectierte Strahl OR mit der doppelten Geschwindigkeit um O dreht wie der Spiegel SS. Dreht sich nämlich dieser um den Winkel φ, so dreht sich das Einfallsloth um denselben Winkel, und damit nimmt auch der Einfallswinkel um diesen

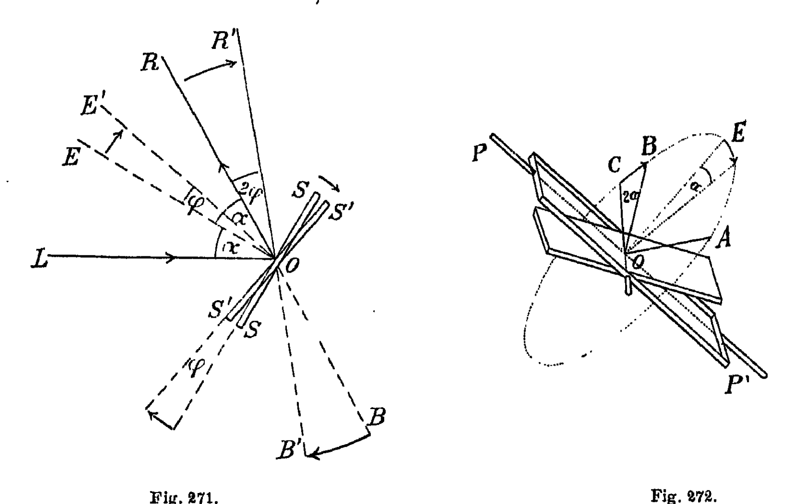


Fig. 271. Fig. 272.

Betrag zu. Der vom einfallenden und reflectierten Strahl gebildete Winkel steigt also von 2α auf $2(\alpha+\varphi)$ und daher ist der Winkel $ROR' = 2\varphi$. Zugleich beschreibt das Spiegelbild im gleichen Sinne, wie der Spiegel sich dreht, den doppelten Bogen BB'.

Der Heliostat hat den Zweck, durch Drehung eines Spiegels den reflectierten Sonnenstrahlen dauernd dieselbe Richtung zu geben. Die Sonne beschreibt scheinbar

täglich einen Kreis, dessen Ebene auf der vom Beobachter nach dem Polarsterne gezogenen Geraden PP' (Fig. 272) senkrecht steht. Fällt diese Ebene mit der Ebene ABC zusammen, und geben wir dem Spiegel die Lage des Rahmens, so dreht sich der reflectierte Strahl um den Winkel 2α, wenn sich die Achse des Spiegels PP' um den Winkel α dreht. Fällt umgekehrt ein Strahl zuerst in der Richtung von CO auf den Spiegel, so wird er nach A reflectiert. Kommen nach einiger Zeit die Sonnenstrahlen in der Richtung BO, die mit ersterer den Winkel 2α einschließt, so werden sie wieder in der Richtung OA reflectiert, wenn sich die Spiegelachse unterdessen um den Winkel α gedreht hat. Da die Sonne in 24 Stunden einen Winkel von 360° beschreibt, so braucht sich die Achse in derselben Zeit nur um 180°, also in einer Stunde um 7° 30' zu drehen, um dem reflectierten Strahl immer dieselbe Richtung zu geben. Wenn sich die Sonne nicht in der Ebene ABC des Himmelsäquators bewegt, so muss der Spiegel mit dem Rahmen einen entsprechenden Winkel einschließen.

Die Gauss-Poggendorff'sche Spiegelablesung. (Fig. 273.) Bei vielen Messungen ist es von Wichtigkeit, sehr kleine Winkel wie z. B. die der Magnetnadel eines Galvanometers aus größerer Entfernung genau zu messen. In diesem Falle wird an der Nadel ein Spiegel SS befestigt, der in der Ruhelage einen in der Richtung AO auf ihn

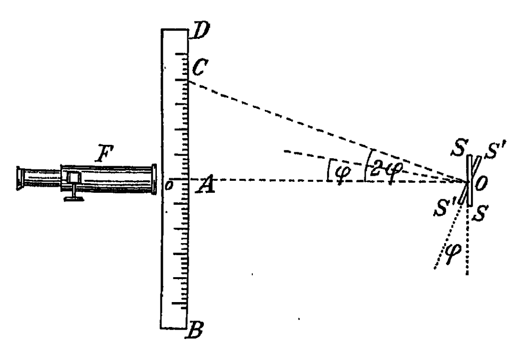


Fig. 273.

fallenden Lichtstrahl wieder in dieser Richtung reflectiert. Wird der Spiegel mit der Nadel um einen Winkel φ gedreht, so dreht sich der reflectierte Strahl OC um den doppelten Winkel 2φ. Stellt man ferner bei A ein Fernrohr F auf, so sieht man mit Hilfe desselben im Spiegel den Punkt C der Scala AD. Dabei ist für sehr kleine Winkel $AC:AO = \text{tang}\, 2\varphi = 2\varphi$, und wir können daher den Ausschlag AC der Ablenkung des Spiegels, beziehungsweise auch der ablenkenden Kraft proportional setzen.

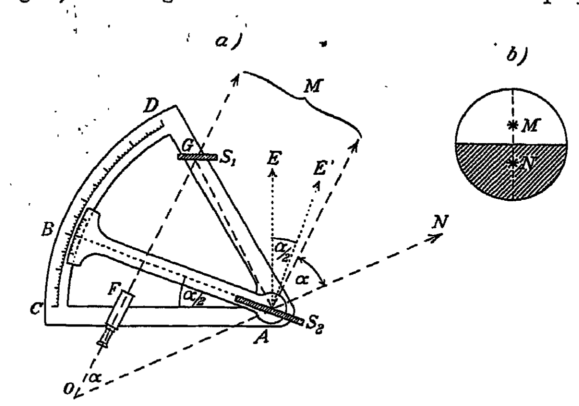


Fig. 274.

Der Spiegelsextant beruht ebenfalls auf der doppelten Verschiebung des Spiegelbildes bei der einfachen Drehung des Spiegels. Man verwendet ihn, um den von zwei Visierlinien OM und ON eingeschlossenen Winkel α zu messen (Fig. 274a). S_1 ist

ein mit dem Sextanten fest verbundener Spiegel, während der Spiegel S_2 um den Punkt A drehbar und mit dem Zeiger AB verbunden ist, welcher die Drehung des Winkels am Bogen des Sextanten CD zu messen gestattet. Den Spiegel S_2 stellt man so ein, dass im Fernrohr F das Bild des Punktes N in der Mitte der unteren Hälfte des Gesichtsfeldes erscheint (Fig. 274b), während man in der Mitte der oberen Hälfte den Punkt M sieht. Der von N kommende Strahl legt also den Weg $NAGFO$ zurück. Stellen wir dagegen den Spiegel S_2 parallel zu S_1 in die Lage AC, so sehen wir auch in der unteren Hälfte des Gesichtsfeldes den Punkt M, und daher hat dieser Strahl den Weg $MAGFO$ zurückgelegt. Sollen aber die von zwei Punkten kommenden Strahlen, welche den Winkel α einschließen, in derselben Richtung AG reflectiert werden, so braucht der Spiegel S_2 nur die halbe Drehung BAC zu machen, und daher können wir auf dem Bogen CD sofort den Winkel α ablesen, wenn an jedem Punkte desselben die doppelten Winkelmaße notiert sind.

Der Winkelspiegel. A_1 und B_1 (Fig. 275) seien zwei Spiegel, die miteinander den Winkel α einschließen und beiderseits diese Winkelfläche symmetrisch abbilden. Die Spiegelbilder von A_1 und B_1, nämlich A_2 und B_2 schließen mit der Winkelsymmetralen OS wieder gleiche Winkel ein. Aber auch die reflectierten Winkelflächen und die in denselben sichtbaren Gegenstände werden neuerdings reflectiert, und so kommen die Bilder der Spiegel A_3 und B_3 zustande und vom Gegenstande M_1 erhalten wir zuerst die beiden Bilder M_2 und M_8 und hierauf die Bilder M_3 und M_7. Zwei weitere Reflexionen mit den Spiegellagen A_3 und B_3 ergeben die beiden Bilder M_4 und M_6. Es bilden sich also um O so viele Winkelflächen ab, als der Quotient $360 : \alpha$ Einheiten enthält. Im Kaleidoskop wird eine zwischen den Spiegeln A_1 und B_1 liegende Figur 6 oder

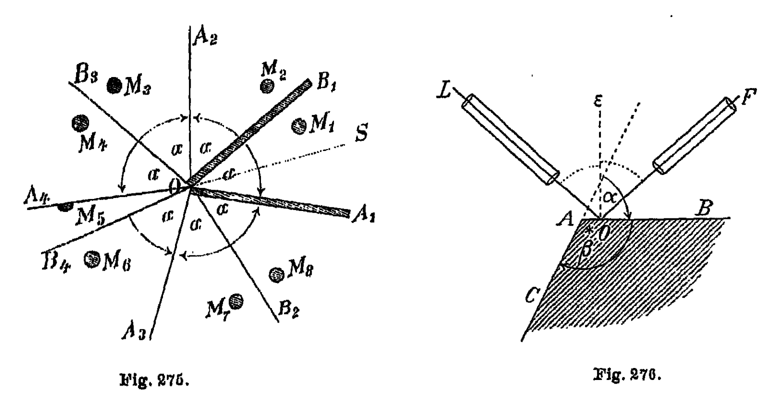


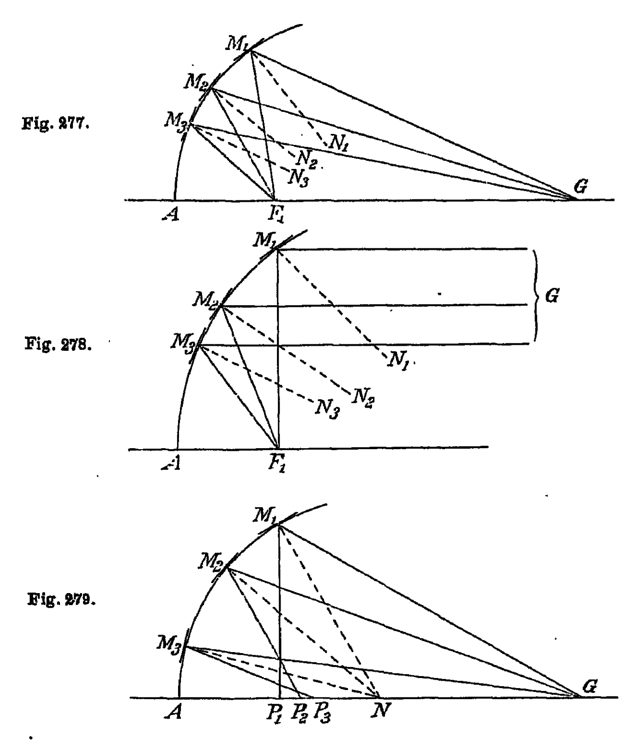
Fig. 275. Fig. 276.

8 mal wiederholt abgebildet, wenn der von den Spiegeln eingeschlossene Winkel 60°, beziehungsweise 45° beträgt.

Das Reflexionsgoniometer dient dazu, bei Krystallen den von zwei Flächen AB und AC (Fig. 276) eingeschlossenen Winkel β zu messen. Wenn man einen von der Lichtquelle L kommenden und an der Krystallfläche reflectierten Strahl im Fernrohre F sieht, so muss die Fläche AB eine ganz bestimmte Lage haben. Kommt das Bild von L bei der Drehung des Krystalles um eine Achse durch den Punkt O im Fernrohre wieder zum Vorscheine, so muss sich die Ebene AC genau in derselben Lage befinden wie früher AB, und daher gibt die am Goniometer ablesbare Drehung den Supplementwinkel α des zu messenden Flächenwinkels β an.

Reflexion an concaven Spiegeln. Stellen wir in den Punkten M_1, M_2 und M_3 (Fig. 277) drei Spiegel so auf, dass die von G ausgehenden Strahlen alle nach dem Punkte F_1 reflectiert werden, so haben die Spiegel die Lage der Tangenten einer durch die Punkte M_1, M_2 und M_3 gehenden Ellipse, denn nur für diese schließen die Leitstrahlen GM und MF_1 mit dem Einfallslothe MN gleiche Winkel ein. Kommen die Strahlen aus einem so fernen Punkte, dass wir sie als parallel betrachten können, so

müssen wir diesen Spiegeln andere Stellungen geben, damit sich die reflectierten Strahlen in F_1 vereinigen (Fig. 278). Es bilden hier die Spiegel die Tangenten einer Parabel, weil nur bei dieser die Einfallslothe MN mit den Strahlen FM denselben Winkel bilden, wie die zur „Achse" parallelen Strahlen MG. Wenn diese krummen Linien um AF als Achse rotieren, so beschreiben sie eine Fläche, die man bei der Ellipse als Rotationsellipsoid und bei der Parabel als Rotationsparaboloid bezeichnet. Eine spiegelnde Fläche von dieser Form vermag also alle von G ausgehenden Strahlen in einem einzigen Punkte F_1 zu vereinigen. Lassen wir endlich die von G ausgehenden Strahlen von einer spiegelnden Hohlkugel reflectieren (Fig. 279), so bilden die Halbmesser die Einfallslothe, und die reflectierten Strahlen schneiden die Achse nicht mehr in einem einzigen Punkte, sondern in den Punkten P_1, P_2 und P_3. In jedem derselben vereinigen sich aber die Strahlen von allen Punkten des Spiegels, welche von A gleich weit entfernt sind.



In jedem Dreiecke theilt aber die Symmetrale eines Winkels die gegenüberliegende Seite in demselben Verhältnisse, wie die anstoßenden Seiten, und daher besteht für das Dreieck GBM (Fig. 280) die Proportion $OB : OG = BM : GM$; es ist daher $OB = OG \cdot \frac{BM}{GM}$.

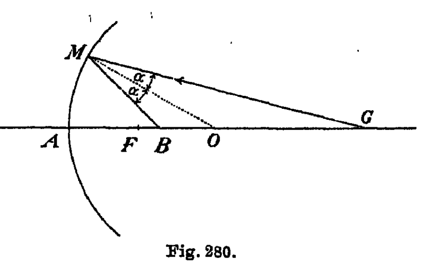


Fig. 280.

Dieses Seitenverhältnis $\frac{BM}{GM}$ ändert seinen Wert um so weniger, je näher der Punkt M dem Punkte A liegt, und dann ist

$$\frac{BM}{GM} = \frac{BA}{GA} = \frac{b}{g},$$

wobei g die Entfernung des Punktes G von A, die sogenannte „Gegenstandsweite", und b die Entfernung des Bildes B von A oder die „Bildweite" bedeutet. Ist daher r der Halbmesser der Kugelfläche, so ist $OB = r - b = (g - r)\frac{b}{g}$. Mit-

hin ist $r\,(b+g) = 2\,bg$ oder $\frac{1}{b} + \frac{1}{g} = \frac{2}{r} = \frac{1}{f}$, wenn wir $\frac{r}{2} = f$ als Brennweite und den Endpunkt F der Strecke $AF = f$ als Brennpunkt bezeichnen. In der Entfernung $b = 1 : \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{g}\right) = \frac{fg}{g-f}$ vom Punkte A vereinigen sich daher alle Strahlen, die, vom Punkte G ausgehend, den Spiegel in der nächsten Umgebung von A treffen. Stellen wir bei B einen Schirm auf, so sehen wir auf demselben das Bild einer in G befindlichen Kerzenflamme, aber von einer Wolke diffusen Lichtes umschleiert, das von jenen Strahlen herstammt, die sich nicht genau im gleichen Punkte vereinigen. Diese Trübung des Bildes tritt um so mehr zurück, je mehr wir die in größerer Entfernung von A auffallenden sogenannten „Randstrahlen vom Spiegel abhalten."

Die Formeln $\frac{1}{b} + \frac{1}{g} = \frac{1}{f}$ und $f = \frac{r}{2}$ gestatten, jede dieser Größen aus den übrigen zu berechnen, sowie auch durch Construction zu finden. Zunächst ergibt sich, dass das Bild eines „unendlich fernen" Punktes im Brennpunkte liegen muss, da $\frac{1}{g} = 0$ und daher $b = f$; rückt der Gegenstand dem Spiegel näher, so entfernt sich zugleich das Bild vom Punkte A, bis sich schließlich Gegenstand und Bild in O begegnen. Hier folgt aus $g = b = r$, dass sich beide im Krümmungsmittelpunkte des Spiegels treffen. Während sich der Gegenstand dem Brennpunkte nähert, wandert

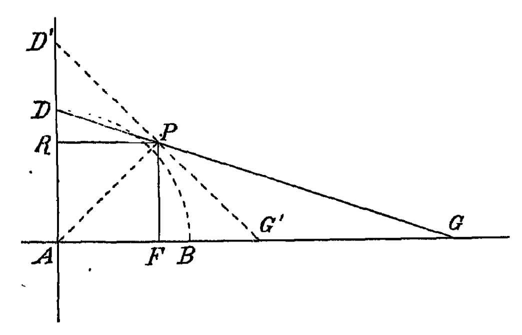


Fig. 281.

das Bild in immer größere Entfernungen, bis schließlich $\frac{1}{b} = 0$, wenn $\frac{1}{g} = \frac{1}{f}$, also $f = g$. Graphisch lässt sich diese Beziehung zwischen Gegenstand und Bildweite auf folgendem Wege darstellen. Wir construieren ein Quadrat $AFPR$ (Fig. 281) mit der Seitenlänge f und verlängern die Seiten AF und AR bis zum Durchschnitt mit einer um den vierten Punkt P drehbaren Geraden DG, dann ist $AD = AB = b$ die Bildweite und $AG = g$ die Gegenstandsweite. Es ist nämlich $DR : RP = PF : FG$, also $(b - f) : f = f : (g - f)$ und daher auch $\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g}$; je weiter sich also G von A entfernt, desto mehr nähert sich D dem Punkte R in der Entfernung f von A. Ist $AG' = 2 . AF = 2\,f$, so ist auch $AD' = 2 . AR = 2 . f$. Es ist ferner immer $f^2 = (b - f)\,(g - f)$, also

die Brennweite f das geometrische Mittel zwischen den Entfernungen der Punkte B und G vom Brennpunkte F.

Schließlich wollen wir die Entstehung des Bildes vom Standpunkte der Wellenbewegung betrachten (Fig. 282). Liegt der Punkt G außerhalb des

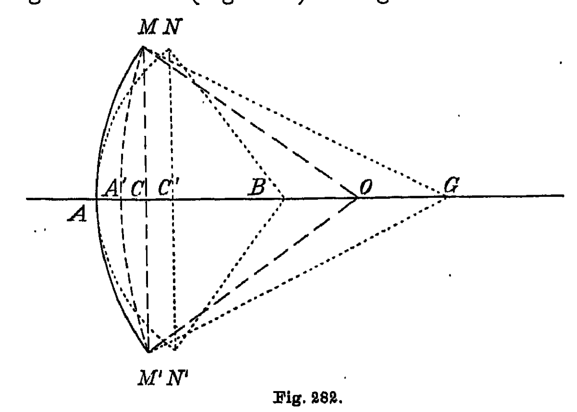


Fig. 282.

Punktes O, so wird die von G ausgehende Kugelwelle $MA'M'$ früher zu den Punkten M und M' gelangen, als zum Punkte A. Wenn sie in A anlangt, so wird die reflectierte Wellenfläche die Form NAN' angenommen haben. Ist $OM = r$, $CM = y$ und $AC = x$, so besteht die Gleichung $y^2 = x \,.\, (2r - x)$. Da wir aber nur kleine Stücke von Kugeloberflächen betrachten, bei welchen der Abschnitt x im Vergleiche zum Durchmesser $2r$ kaum in Betracht kommt, so können wir auch $y^2 = 2rx$ setzen. Für die Höhe der Kugelcalotte MAM' in Fig. 282 besteht also die Gleichung $AC = x_r = \frac{y^2}{2r}$. Die Calotte der von G ausgehenden Kugelwelle $MA'M'$ hat aber bei gleicher Sehne die Höhe $A'C = x_g = \frac{y^2}{2g}$ und die Calotte der reflectierten Welle NAN' die Höhe $AC' = x_b = \frac{y^2}{2b}$.

Da $AA' = CC'$, weil die Welle diese beiden Strecken in derselben Zeit zurücklegt, so ist

$$AA' = AC - A'C = x_r - x_g = CC' = AC' - AC = x_b - x_r\,,$$

und aus $\frac{y^2}{2r} - \frac{y^2}{2g} = \frac{y^2}{2b} - \frac{y^2}{2r}$ folgt unmittelbar $\frac{2}{r} = \frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g}$.

Wir haben bisher nur das Bild eines in der optischen Achse liegenden Punktes G aufgesucht, dessen Strahlen sich wieder in einem Punkte der Achse vereinigen. Um aber das Bild eines Gegenstandes zu construieren, der auch außer der Achse liegende Punkte enthält, verfährt man folgendermaßen (Fig. 283): AG sei die optische Achse, MM' stelle den fast ebenen mittleren Theil des Hohlspiegels dar und GG' den Gegenstand, dessen Bild construiert werden soll. Der zur Achse parallele Strahl $G'C$ muss nach der Reflexion durch den Brennpunkt F gehen. Der durch den Brennpunkt gehende Strahl $G'FC$ wird parallel zur Achse reflectiert und schneidet den Strahl CF in B'. Das Bild des Punktes G finden wir, indem wir mit der Brennweite f das Quadrat $AFPR$ construieren, die Gerade GP bis D verlängern und die Strecke $AD = AB$ auf AG auftragen. BB' ist dann das Bild von GG'. Au

dieser Figur ergibt sich zugleich die Größenbeziehung zwischen Gegenstand und Bild. Es ist nämlich

$$BB' = AC' \text{ und } AC' : GG' = AF : FG = f : (g - f)$$

und wegen $\frac{1}{b} + \frac{1}{g} = \frac{1}{f}$ ist $\frac{g}{b} = \frac{g}{f} - 1 = \frac{g-f}{f}$, also $\frac{b}{g} = \frac{f}{g-f}$; mithin ist auch $BB' : GG' = b : g$. Das Verhältnis von Gegenstand- und Bildgröße ist also dasselbe, wie das von Gegenstandweite und Bildweite.

In den zwischen B und B' liegenden Punkten vereinigen sich auch die von den entsprechenden Punkten des Gegenstandes kommenden Strahlen

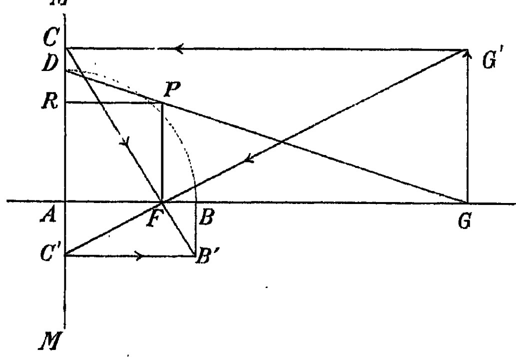


Fig. 283.

und gehen von diesen im Sinne des Huygens'schen Principes aus, wie von den Punkten des Gegenstandes selbst. Man bezeichnet daher solche Bildpunkte als **wirkliche** oder **reelle Bilder**, im Gegensatze zu den **imaginären** oder **virtuellen Bildern**, wie z. B. in Fig. 270, wo die Strahlen durch die Reflexion nur in solchen Richtungen in das Auge kommen, als ob sie von A' ausgegangen wären, wohin sie aber thatsächlich gar nie gelangten. Der Punkt A' hat also nur den Charakter eines geometrischen Constructionsmittels.

Construieren wir endlich das Bild eines Gegenstandes, der sich zwischen dem Spiegel A und seinem Brennpunkte F befindet (Fig. 284). Wir verbinden zu diesem Zwecke den außerhalb der Achse liegenden Punkt G' mit dem Brennpunkte F und verlängern diese Gerade bis C; hier wird dieser Strahl so reflectiert, als ob er aus B' käme. Der parallel zur Achse auf den Spiegel fallende Strahl $G'C'$ schlägt nach der Reflexion die Richtung $C'F$ ein, die mit der Richtung $B'F$ zusammenfällt. Beide Strahlen scheinen also vom Punkte B' auszugehen. Den in der Achse liegenden Bildpunkt erhalten wir, indem wir G mit P verbinden, diese Gerade PG schneidet aber die Gerade AR nicht oberhalb der Achse, sondern unterhalb, und daher tragen wir diese als negativ

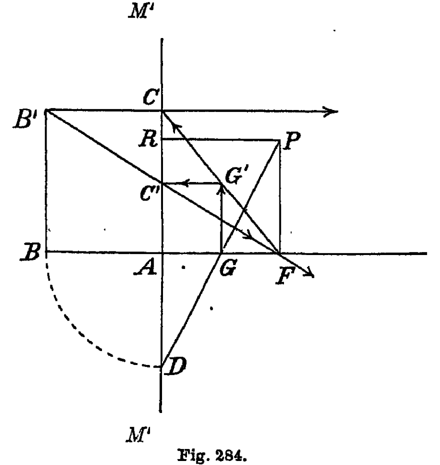


Fig. 284.

zu bezeichnende Strecke nicht nach rechts, sondern nach links auf und

gelangen so zum Punkte B. Für die Größe dieses imaginären Bildes beste[…] wieder die Proportion

$$BB' : GG' = AC : GG' = AF : GF = f : (f - g) = -\frac{b}{g}.$$

Das negative Vorzeichen des letzteren Ausdruckes hängt mit de[…] virtuellen Charakter des Bildes zusammen. Je näher also Gegenstand u[…] Bild an den Spiegel heranrücken, desto mehr nähert sich ihr Größenverhältn[…] der Einheit.

Convexspiegel sind solche sphärische Spiegel, bei welchen die erhabe[…] Seite der Kugeloberfläche spiegelt (Fig. 285). Der von O aus beschriebene Bogen MA[…] stelle die spiegelnde Fläche und G den Ausgangspunkt der Kugelwelle dar. Die würde auf der Achse bis A' vordringen, wenn sie die Punkte M und M' erreicht h[…]

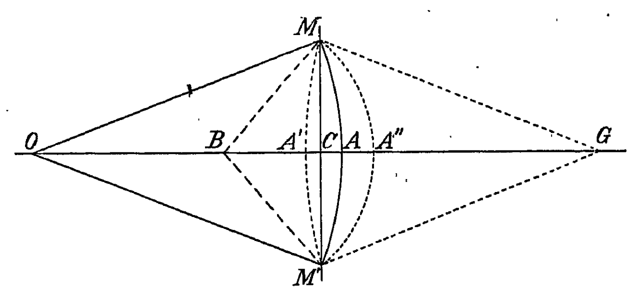


Fig. 285.

falls nicht früher die Reflexion eingetreten wäre; infolge der letzteren wird aber [...] Welle unterdessen von A bis A'' zurückgeworfen. Es ist also

$$A'A = A'C + CA = x_g + x_r = AA'' = AC + CA'' = CA'' - CA = x_b - x_r.$$

Da $A'C = x_g = -\frac{y^2}{2g}$, $CA = x_r = -\frac{y^2}{2r}$ und $CA'' = x_b = -\frac{y^2}{2b}$, wenn der Si[…] der Bewegung GC positiv genommen wird, so folgt aus der obigen Gleichu[…] $2x_r = x_b - x_g$ und daraus $\frac{1}{g} - \frac{1}{b} = -\frac{2}{r}$. Wenn also der Radius nach d[…] entgegengesetzten Seite gerichtet ist, so ändert auch der Ausdruck für die Bildwe[…] sein Vorzeichen, und dementsprechend erscheint das Bild hinter dem convexen Spieg[…]

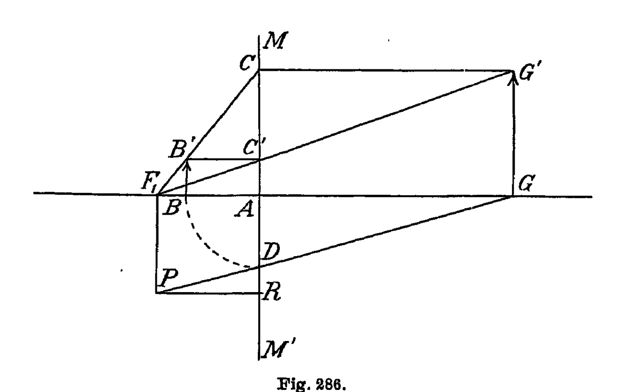


Fig. 286.

Die reflectierten Wellen nehmen daher immer größere Halbmesser an, die v[…] imaginären Spiegelbilde auszugehen scheinen.

Parallel auffallende Strahlen werden mithin so reflectiert, als ob sie aus d[…] Halbierungspunkte F_1 des Krümmungsradius kämen. Wir fassen deshalb die Bre[…]

weite als negativ auf und verlegen das zur Construction des Bildpunktes verwendete Quadrat in den entgegengesetzten Quadranten (Fig. 286). Um das Bild B des Punktes G zu finden, verbinden wir denselben mit P und tragen die Strecke AD auf der linken Seite von A auf. Das Bild des außerhalb der Achse liegenden Punktes G' ist der Punkt B'; um ihn zu finden, construieren wir die Parallele zur Achse $G'C$ und verbinden C mit F_1 durch die Gerade F_1C, ferner wird jeder von G' nach F_1 gerichtete Strahl in C' in der Richtung $B'C'$ reflectiert, dass er F_1C in B' schneidet. Beide Strahlen werden daher so reflectiert, als ob sie von B' ausgehen würden. Wo immer sich also der Punkt G auf dem Strahle AG befinden mag, stets wird sich D zwischen R und A und der Bildpunkt B innerhalb der Brennweite befinden. Da endlich der Punkt B' auf der Verbindungslinie F_1C liegt und $AC = GG'$, so wird das Bild BB' immer kleiner als der Gegenstand sein.

Betrachten wir z. B. die in einer Landschaftskugel sichtbare Umgebung, so erscheinen uns die entferntesten Punkte derselben auf einer Kugel mit halbem Radius aufgetragen und die Bilder der näheren Objecte erscheinen entsprechend näher an der Oberfläche des Spiegels.

Brechung des Lichtes (Dioptrik).

Den Fundamentalversuch der Brechung beschreibt der Entdecker des Brechungsgesetzes W. Snellius ungefähr mit den Worten: „Man legt ein Geldstück auf den Boden eines Gefäßes und geht so weit zurück, bis es hinter der Wand desselben verschwindet. Dann bleibt man stehen und lässt Wasser in das Gefäß gießen, wodurch das Geldstück wieder zum Vorschein kommt. Der ganze Boden des Gefäßes scheint dadurch gehoben zu sein.“ In dieser Form war die Brechungserscheinung schon im Alterthum bekannt. Snellius formulierte aber das Gesetz, nach dem die Strahlenablenkung erfolgt, und wies nach, dass $n = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta}$. Vom Standpunkte der Wellenlehre betrachtet, stellt n das Verhältnis der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten dar, und daher beweist das Brechungsgesetz, dass sich das Licht nicht plötzlich, sondern in verschiedenen Medien mit verschiedener Geschwindigkeit ausbreitet. Dass das Licht wirklich eine Wellenbewegung sei, vermochte man aber auf Grund des Brechungsgesetzes allein noch nicht zu entscheiden.

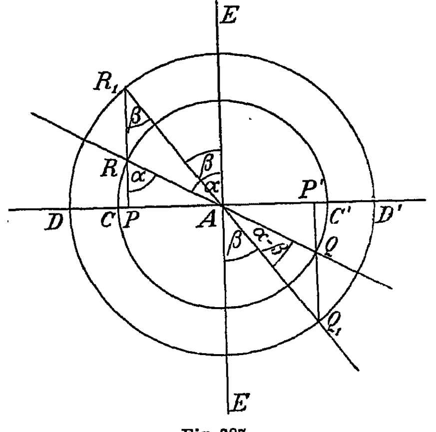


Fig. 287.

Durch Construction findet man den gebrochenen Strahl auf folgendem Wege (Fig. 287). Wir ziehen um den Punkt A, in dem der Strahl RA die Grenze der beiden Medien trifft, zwei Kreise, die sich wie die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten in den beiden Medien verhalten, deren Verhältnis also n ist. Es sei also

$$r_1 : r_2 = DA : CA = c_1 : c_2.$$

Im Punkte R errichten wir eine Senkrechte PR, welche den größeren Kreis im Punkte R_1 trifft. R_1AQ_1 ist dann die Richtung des gebrochenen Strahles. Dieser bildet mit dem Einfallslothe EE den Brechungswinkel β, der kleiner ist als der Einfallswinkel α; man spricht daher in diesem Falle von einer „Brechung zum Einfallslothe“. Wenn wir die Brechung eines Strahles Q_1A betrachten, der vom unteren Medium M_2 in das obere M_1 übergeht, so müssen wir vom Punkte Q_1 aus die Senkrechte Q_1P' construieren. In

diesem Falle gibt die Gerade QAR die Richtung des gebrochenen Strahles an, der mit dem Einfallslothe einen größeren Winkel einschließt, und daher sagt man, der Strahl sei „vom Einfallslothe“ gebrochen worden.

Die Richtigkeit dieser Constructionen ergibt sich aus den Gleichungen

$$AP = AR \sin\alpha = AR_1 \sin\beta \quad \text{und} \quad \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{AR_1}{AR} = \frac{AD}{AC} = \frac{r_1}{r_2} = \frac{c_1}{c_2} = n.$$

Wenn $\sin\alpha = 0$, so muss wegen $\sin\alpha = n \,.\, \sin\beta$ auch $\beta = 0$; obwohl sich in diesem Falle die Richtung des gebrochenen Strahles nicht ändert, so ist derselbe doch als ein gebrochener aufzufassen, da uns die Strahlen von einem anderen Punkte auszugehen scheinen. Der Boden eines mit Wasser gefüllten Gefäßes erscheint uns auch dann gehoben, wenn wir in verticaler Richtung in das Wasser hineinblicken.

Wenn der Brechungswinkel kleiner als der Einfallswinkel und daher $n > 1$ ist, wie es z. B. beim Übergang von Luft in Wasser der Fall ist, so bezeichnet man das zweite Medium als „optisch dichter“. Ist $\alpha = 90^0$, also $\sin\alpha = 1$, so ist $\sin\beta = \frac{1}{n}$. Für den Übergang vom dichteren Medium in das dünnere ist der Brechungsindex der reciproke Wert des früheren und daher $n' = \frac{1}{n} < 1$; mithin gibt es nur so lange einen gebrochenen Strahl, als in $\sin\alpha = n' \sin\beta$ der Wert von $\sin\beta = \frac{1}{n'} \sin\alpha = n \sin\alpha < 1$. Für $\sin\beta = 1$ besteht die Gleichung $\sin\alpha = n' = \frac{1}{n}$. Gelangt also aus einem optisch dichteren Medium ein Lichtstrahl unter einem so schiefen Winkel an die Grenze, dass der vom Lothe gebrochene Strahl in die Grenzfläche der beiden Medien fällt, so tritt gar kein Licht in das optisch dünnere Medium über, und dann enthält der reflectierte Strahl, der gleichzeitig mit der Brechung aufgetreten ist, die gesammte Lichtstärke des einfallenden Strahles. Man bezeichnet daher diese Reflexion als eine t o t a l e. Um von einem Gegenstande durch Reflexion ein gutes Bild zu erhalten, verwendet man immer die totale Reflexion.

Die Wirkung der totalen Reflexion kann man deutlich wahrnehmen, wenn man eine Probette in ein mit Wasser gefülltes Glas senkt und von

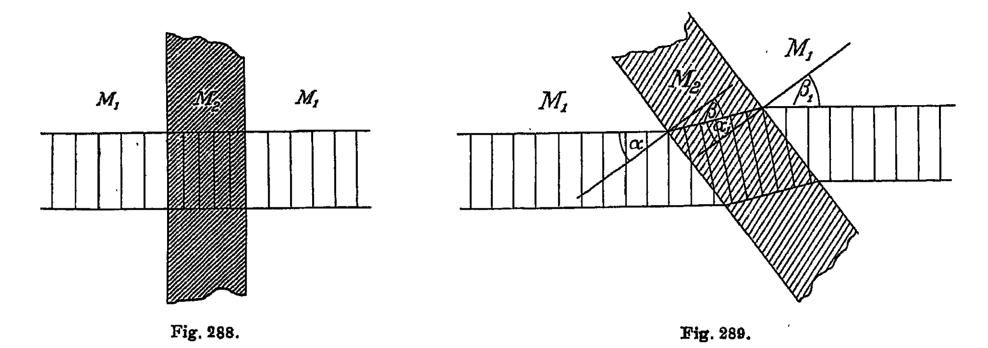


Fig. 288. Fig. 289.

oben auf den äußeren Mantel der Probette blickt. Diese scheint mit Quecksilber gefüllt zu sein, weil das von unten in das Glas eintretende Licht an der Begrenzungsfläche von Glas und Luft total reflectiert wird.

Geht ein Wellenstrahl senkrecht zur Oberfläche durch eine planparallele Glasplatte mit dem Brechungsindex $^3/_2$ hindurch, so gibt uns die Fig. 288 die Lage seiner Wellenflächen nach gleichen Zeitintervallen an; ihre Abstände sind im Glas $^2/_3$ mal kleiner als in der Luft. Schließt die Richtung des Wellenstrahles mit dem Einfallslothe den Winkel α ein, so wird der Strahl beim Austritt aus der Platte zwar nicht abgelenkt, er erleidet aber eine parallele Verschiebung, wie sie Fig. 289 zeigt. Die Strahlenrichtung schließt nämlich innerhalb der Platte mit dem Einfallslothe den Brechungswinkel β ein, der beim Übergang in die Luft wieder den Wert α annimmt; denn $\beta = \alpha_1$ und $\frac{\sin \alpha_1}{\sin \beta_1} = n' = \frac{1}{n} = \frac{\sin \beta}{\sin \alpha}$, also ist auch $\sin \alpha = \sin \beta_1$ und $\beta_1 = \alpha$. Sind die Begrenzungsflächen des Mediums M_2 nicht parallel, so bezeichnet man dasselbe als ein optisches Prisma. Die Gerade, in welcher sich die beiden Flächen schneiden, nennt man die brechende Kante, und den Winkel, den sie einschließen, den brechenden Winkel.

Um den Gang des Strahles durch ein Prisma zu finden, ziehen wir

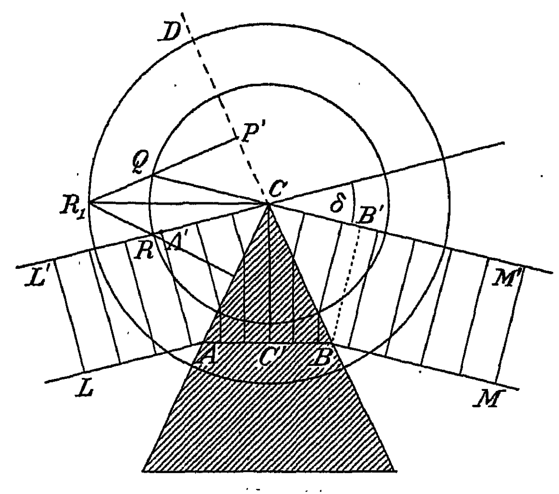


Fig. 290.

um C zwei Kreise, deren Halbmesser-Verhältnis dem Brechungsindex gleich ist (Fig. 290). Wir erhalten zum einfallenden Strahl RC den gebrochenen, indem wir die Senkrechte von R auf AC bis R_1 verlängern und R_1 mit C verbinden. Die zu RC parallele Richtung LA geht also im Prisma in die zu R_1C parallele Richtung AB über. Die Richtung des austretenden Strahles ergibt sich, indem wir von R_1 die Senkrechte R_1P' auf die Verlängerung von BC fällen und den Punkt Q mit C verbinden. QCR ist der „Deviationswinkel" δ und die Wellenfläche nimmt der Reihe nach in der Luft die Lage LL', im Prisma CC' und endlich die Lage BB' an.

Bei der Ablenkung eines Lichtstrahles durch ein Prisma beobachten wir, dass er von der brechenden Kante weg um den Winkel δ gedreht wird. Wenn wir das Prisma um die brechende Kante drehen, so ändert sich auch die Richtung des abgelenkten Strahles, und zwar erreicht der Deviationswinkel seinen kleinsten Wert, wenn der eintretende und der austretende Strahl mit

den Seiten des Prismas gleiche Winkel einschließen. Die geringste Deviation ist also vorhanden, wenn der Lichtstrahl das Prisma symmetrisch durchsetzt. Die Deviation nimmt nämlich sofort zu, wenn man das Prisma aus dieser Lage verschiebt (Fig. 291). RC sei die Richtung des einfallenden Strahles,

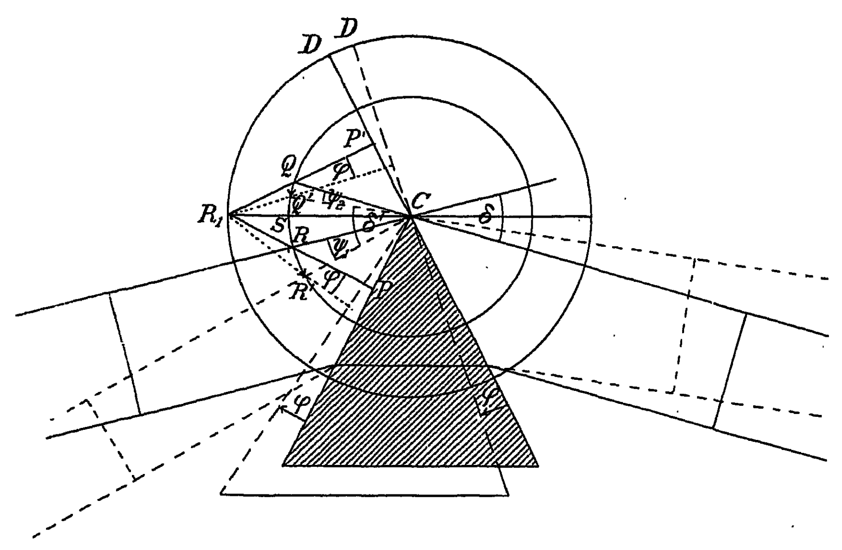


Fig. 291.

$R_1 C$ die des Strahles im Prisma und QC die des austretenden Strahles. Ist also der Strahlengang ein symmetrischer, so ist das Viereck $R_1 R C Q$ ein Deltoid und $RS = SQ$. Drehen wir das Prisma um einen Winkel φ um die brechende Kante C und fällt der Lichtstrahl in der Richtung $R' C$ ein, so drehen sich auch die Geraden $R_1 R$ und $R_1 Q$ um den gleichen Winkel φ, da diese Geraden auf den Seiten des Prismas senkrecht stehen.

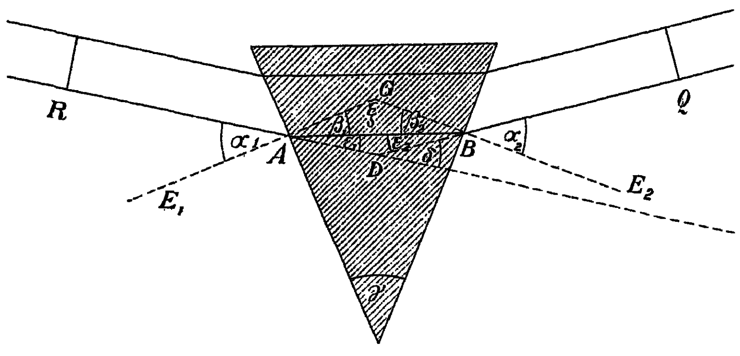


Fig. 292.

Der um R_1 gegen die Innenseite sich drehende Schenkel $R_1 Q'$ schneidet aber auf dem Kreise durch Q einen kleineren Bogen $Q Q'$ ab, als der nach außen gedrehte Strahl $R_1 R'$; dem Bogen RR' entspricht also auch ein größerer Centriwinkel als dem Bogen $Q Q'$ ($\psi_1 > \psi_2$), und damit wird auch der Deviationswinkel δ' größer, da er auf der einen Seite um mehr zunimmt,

als er auf der anderen Seite abgenommen hat. Zum gleichen Resultate wären wir gekommen, wenn wir das Prisma nach der anderen Seite gedreht und dem einfallenden Strahl ebenfalls eine solche Richtung gegeben hätten, dass die Richtung des Strahles im Prisma $R_1 C$ dieselbe bleibt.

Durchsetzt ein Lichtstrahl (Fig. 292) das Prisma auf dem Wege $RABQ$, so schließen die in den Punkten A und B errichteten Einfallslothe bei G den Winkel $AGB = \xi$ ein, der zum brechenden Winkel γ supplementär ist; daher ist $\xi + \gamma = 2R$. Es ist aber auch $\xi + \beta_1 + \beta_2 = 2R$, folglich $\gamma = \beta_1 + \beta_2$. Als Außenwinkel ist der Deviationswinkel
$\delta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = (\alpha_1 - \beta_1) + (\alpha_2 - \beta_2) = (\alpha_1 + \alpha_2) - (\beta_1 + \beta_2) = \alpha_1 + \alpha_2 - \gamma$, und daher ist $\delta + \gamma = \alpha_1 + \alpha_2$.

Beim symmetrischen Strahlengang ist aber $\alpha_1 = \alpha_2$ und $\alpha_1 + \alpha_2 = 2\alpha_1$,

mithin $\alpha_1 = \frac{\delta + \gamma}{2}$ und wegen $\beta_1 = \beta = \frac{\gamma}{2}$ ist $n = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \beta_1} = \frac{\sin \frac{\delta + \gamma}{2}}{\sin \frac{\gamma}{2}}$.

Die beiden Winkel δ und γ, welche in dieser Formel vorkommen, werden mit Hilfe des „Spectrometers“ bestimmt (Fig. 293). Wir befestigen das Prisma auf einem um seinen Mittelpunkt O drehbaren Tischchen so, dass die brechende Kante C mit der Drehungsachse nahezu zusammenfällt. Wird der Lichtstrahl AO von der Fläche MC in der Richtung OE reflectiert, so brauchen wir nur das Tischchen sammt dem Prisma um den Winkel $2R - \gamma$ zu drehen, bis der von der Ebene NC reflectierte Strahl in die Richtung OE fällt, und daraus entnehmen wir den Winkel γ. Um den Deviationswinkel δ zu messen, beobachten wir die Richtung des gebrochenen Strahles in jener Lage OD, wo er von der Richtung OB am wenigsten abweicht und bei jeder Drehung des Prismas sich von OB entfernt.

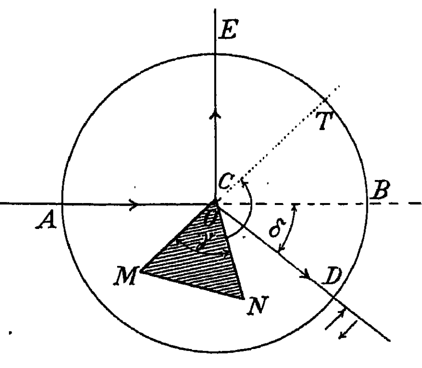


Fig. 293.

Soll also der Brechungsindex eines durchsichtigen Körpers bestimmt werden, so müssen wir bei einem aus demselben hergestellten Prisma den brechenden Winkel γ und das Minimum der Deviation δ messen. Flüssige Körper gibt man in ein prismatisches Gefäss, das mit planparallelen Wänden verschlossen ist; ist deren Neigungswinkel γ bekannt, so braucht man nur noch das Minimum der Deviation δ zu beobachten. Auf demselben Wege lässt sich auch der Brechungsindex für Gase feststellen.

Bei allen derartigen Messungen begegnen wir einer neuen Erscheinung, dass nämlich der gebrochene Strahl bei zunehmender Entfernung einen immer größeren Querschnitt annimmt und in verschiedenen Theilen verschiedene Farben zeigt. Wir bemerken, dass die blauen und noch mehr die violetten Strahlen eine stärkere Brechung erleiden als die gelben und rothen. Wenn wir also von einem bestimmten Brechungsindex sprechen, so bezieht sich derselbe immer auf einen gewissen Farbenton, und zwar verwendet man hiezu gewöhnlich die gelben Strahlen, die wir später mit dem Buchstaben D bezeichnen werden. Das geringste Brechungsvermögen besitzen dem luftleeren

Raume gegenüber die Gase, am stärksten wird das Licht gebrochen, wenn es vom luftleeren Raume oder, was nahezu auf dasselbe hinauskommt, von der Luft in einen Diamanten eintritt. Von den verschiedenen Glassorten haben die bleihältigen Flintgläser im allgemeinen einen größeren Brechungsindex als die bleifreien Crowngläser. Der Brechungsindex ist für den Übergang vom luftleeren Raum in

Wasserstoff	1·000143	Wasser	1·333	Quarz	1·544
Luft	1·000243	Zimmtöl	1·619	Kalkspath	1·659
Kohlensäure	1·000449	Schwefelkohlenstoff	1·63	Diamant	2·417

Der Brechungsindex der Jenaer Crowngläser liegt zwischen 1·505 bis 1·573 und derjenige der Flintgläser zwischen 1·55—1·963.

Die Brechung des Lichtes an gekrümmten Flächen. Die fast ebene Wellenfläche, welche von einem sehr entfernten Lichtpunkte ausgeht, wird von einem ebenen Spiegel immer wieder als ebene Wellenfläche reflectiert. Eine ebene Wellenfläche, die sich einem Hohlspiegel in der Richtung der optischen Achse nähert, wird als Kugelwelle zurückgeworfen, deren Mittelpunkt der Brennpunkt ist, und eine von hier ausgehende Kugelwelle wird vom Hohlspiegel als ebene Welle reflectiert. Auch beim Eintritte der ebenen Wellenfläche in ein neues Medium wird ihre Form nicht geändert, wenn die Begrenzungsflächen eben sind; es erübrigt uns noch zu untersuchen, wie sie sich ändert, falls die Begrenzungsflächen der beiden Medien kugelförmig gekrümmt sind.

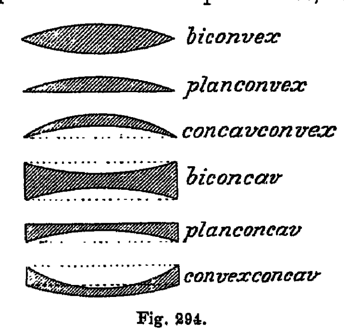


Fig. 294.

Fig. 294 zeigt die gebräuchlichsten Formen der optischen Linsen. Die drei convexen Formen sind in der Mitte dicker als am Rande, die concaven dagegen am Rande stärker als in der Mitte.

Die Bilder der Convexlinsen. Vom Punkte G (Fig. 295) gehe ein Lichtbündel aus, dessen Strahlen in der biconvexen Linse MM' gebrochen werden. Dabei bildet der kreisförmige Rand die brechende Kante eines

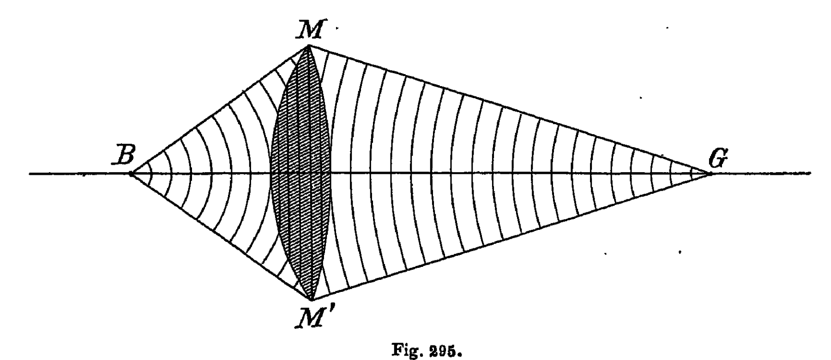


Fig. 295.

Prismas, und die Strahlen werden daher in der Richtung gegen die Achse abgelenkt. Die vom Punkte G divergent ausgehenden Strahlen convergieren also infolge der Brechung nach dem auf der Achse liegenden Bildpunkte B. Die von G ausgehenden Kugelwellen erreichen die Linse zuerst im Achsen-

punkte, und gelangen erst später zum Rand MM'. Die Wellenfläche erfährt also in der Linse eine Abplattung, und nach dem Austritte aus der Linse eine Krümmung nach der entgegengesetzten Seite. Beschreiben wir von G aus (Fig. 296) einen Kreis mit dem Radius $g = GM$, und von B

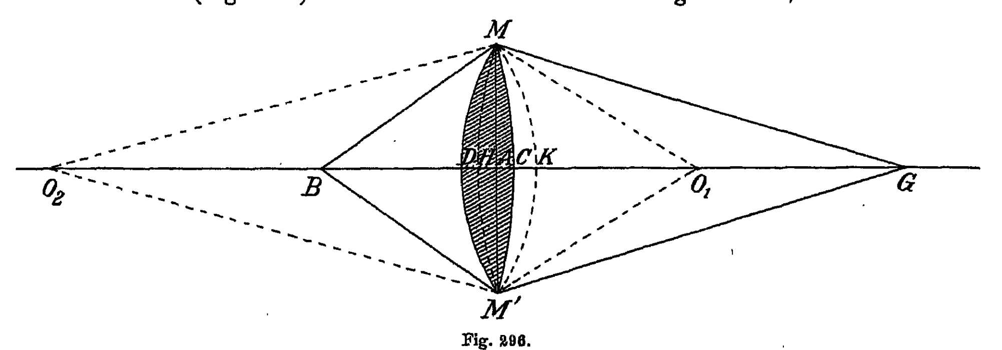


Fig. 296.

aus einen Kreis mit dem Radius $b = BM$, so können wir, wie bei den Hohlspiegeln $AM = y$, $AH = x_g = \frac{y^2}{2g}$ und $AK = x_b = \frac{y^2}{2b}$ setzen; die auf der Achse gemessene Strecke GB ist also um

$$x_g + x_b = \frac{y^2}{2g} + \frac{y^2}{2b} = \frac{y^2}{2}\left(\frac{1}{g} + \frac{1}{b}\right)$$

kürzer als der Weg $GMB = g + b$. Wenn die Welle längs der Achse fortschreitend die Linse von der Dicke d und mit dem Brechungsindex n durchsetzen muss und doch gleichzeitig mit den Randstrahlen nach B gelangt, so erleidet sie beim Durchgange durch das Glas eine Verzögerung, die der schon berechneten Wegdifferenz gleich sein muss. Mit Benützung derselben angenäherten Formeln erhalten wir für die Dicke der Linse die Formel $d = CD = CA + AD = x_1 + x_2 = \frac{y^2}{2r_1} + \frac{y^2}{2r_2} = \frac{y^2}{2}\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)$.

Während aber die Welle die Strecke d im Glase zurücklegt, würde sie die Strecke nd in der Luft zurücklegen, sie bleibt also auf dem Wege längs der Achse um die Strecke $nd - d = (n-1)\,d = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)\frac{y^2}{2}$ zurück, welche mithin der oben berechneten Wegdifferenz gleich sein muss; daher ist $(n-1)\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)\frac{y^2}{2} = \left(\frac{1}{g} + \frac{1}{b}\right)\frac{y^2}{2}$. Es besteht mithin wieder die Gleichung $\frac{1}{b} + \frac{1}{g} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right) = \frac{1}{f}$, wenn $\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)$ gesetzt und f als Brennweite bezeichnet wird, weil damit für $\frac{1}{g} = 0$, $b = f$. Wenn $r = r_1 = r_2$, so ist also $\frac{1}{f} = (n-1)\,.\,\frac{2}{r}$ und $f = \frac{r}{2\,(n-1)}$.

Bei einer planconvexen Linse ist der Krümmungsradius der ebenen Linsenfläche so groß, dass sein reciproker Wert $\frac{1}{r} = 0$ gesetzt werden muss, und dann ist $f = \frac{r}{n-1}$. Ist der Ausgangspunkt der Strahlen G von der

Linse so weit entfernt, dass wir $\frac{1}{g} = 0$ setzen können, so ist offenbar $\frac{1}{b} = \frac{1}{f}$ und $f = b$, die parallel zur Achse auf die Linse fallenden Strahlen einer ebenen Wellenfläche werden so gebrochen, dass sich die Strahlen im Punkte F_1 der Achse vereinigen (Fig. 297). Wenn wir den Lichtpunkt G der Linse nähern, so

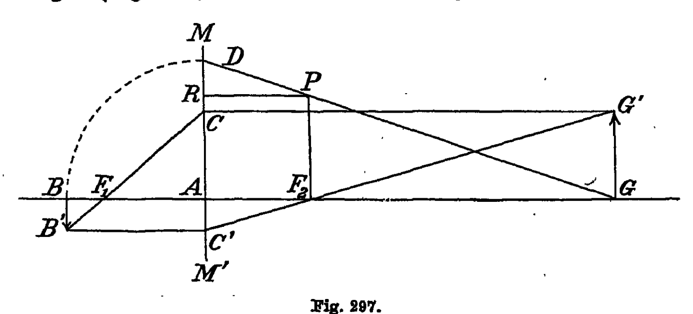


Fig. 297.

entfernt sich der Bildpunkt von der Linse, und wenn $b = g$, so folgt aus $\frac{1}{b} + \frac{1}{g} = \frac{1}{f}$, dass $f = \frac{g}{2} = \frac{b}{2}$. Wenn endlich $g = f$, also $\frac{1}{g} = \frac{1}{f}$, so muss $\frac{1}{b} = 0$, mithin b so groß sein, dass das Bild in unendliche Entfernung hinausrückt; die Strahlen treten dann parallel aus, und die Wellenfläche verlässt die Linse als Ebene.

In Fig. 297 stelle MM' die Lage der Convexlinse dar. Um die Lage des Bildes BB' eines Gegenstandes GG' zu finden, construieren wir zunächst mit Hilfe der beiderseitigen Brennpunkte F_1 und F_2 das Bild des Punktes G'. Wir ziehen die Gerade $G'C$ parallel zur optischen Achse; dieser Strahl wird so gebrochen, dass er durch den hinteren Brennpunkt F_1 geht. Der durch den vorderen Brennpunkt F_2 gehende Strahl trifft die Linse im Punkte C' und verlässt sie in der zur Achse parallelen Richtung $C'B'$; der Durchschnittspunkt mit dem Strahle $F_1 C$ gibt die Lage des Bildpunktes B' an. Das Bild des Punktes G finden wir dadurch, dass wir mit der Brennweite f das Quadrat $AF_2 PR$ construieren und den Durchschnittspunkt D der Geraden GP mit der Ebene AM aufsuchen. Dann ist $AB = AD$ und BB' das Bild von GG'.

Aus der Ähnlichkeit der Dreiecke $GG'F_2 \sim AC'F_2$ folgt die Proportion $GG' : GF_2 = AC' : AF_2$. Daher ist $\frac{BB'}{GG'} = \frac{AC'}{GG'} = \frac{AF_2}{GF_2} = \frac{f}{g-f} = \frac{b}{g}$ wie bei den Hohlspiegeln. Da ferner

$$(g-f)\ (b-f) = f^2, \text{ weil } (g-f)\ (b-f) = gb - gf - bf + f^2$$

und wegen $\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g}$ auch $gb - gf + bf = 0$, so besteht der Satz, dass die Brennweite die mittlere geometrische Proportionale ist zwischen den Abständen des Gegenstandes und des Bildes von den ihnen näher liegenden Brennpunkten.

Aus der Construction der Punkte B und B' ergibt sich, dass alle Bilder, die wir von einem außerhalb der Brennweite befindlichen Gegenstande mit Hilfe einer convexen Linse herstellen können, wirkliche und umgekehrte sind.

Betrachten wir den Fall, wenn sich der Gegenstand innerhalb der Brennweite der Linse befindet. (Fig. 298.) AM stelle die obere Hälfte der Linse dar und AF_2PR das mit der Brennweite als Seite construierte Quadrat. Die Entfernung des Bildpunktes erhalten wir durch Verbindung der Punkte G und P, und diese Gerade schneidet die Gerade AM in D, also auf der entgegengesetzten Seite von AM, und daher tragen wir diese Strecke nicht in der Richtung AF_1, sondern nach rechts auf und erhalten so den Bildpunkt B auf der Achse. Um den Bildpunkt von G' zu finden, construieren wir die Gerade $G'C$ parallel zur Achse und verbinden C mit F_1; der von G' in der Richtung F_2G' ausgehende Strahl wird durch die Linse so gebrochen, dass er dieselbe in der Richtung $C'Q$ verlässt; da die beiden Strahlen $C'Q$ und CF_1 divergent austreten, so kann auf dieser Seite kein Bild mehr zustandekommen, wohl aber treten die Strahlen in solchen Richtungen aus, als ob sie vom Punkte B' ausgiengen. Das Bild BB' ist also imaginär und aufrecht.

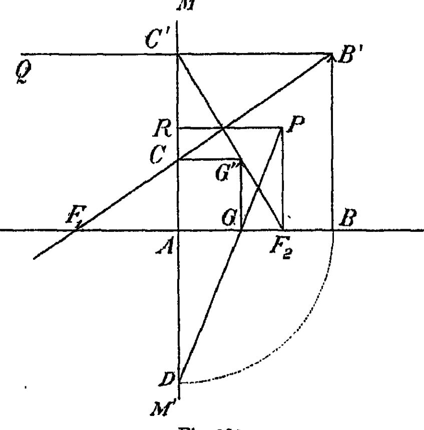


Fig. 298.

Es bestehen ferner die Proportionen $\frac{BB'}{GG'} = \frac{BB'}{AC} = \frac{F_1B}{F_1A} = \frac{f+b}{f}$. Da wir die Bildweite diesmal auf der entgegengesetzten Seite aufgetragen haben, so versehen wir die Strecke b auch mit dem entgegengesetzten Vorzeichen und erhalten so aus der Formel $\frac{1}{f} = \frac{1}{g} - \frac{1}{b}$ die Gleichung $\frac{b}{g} = \frac{b}{f} + 1 = \frac{b+f}{f}$, und es ist wieder $\frac{BB'}{GG'} = \frac{b}{g}$. Das imaginäre Bild ist also von der Linse weiter entfernt, als der Gegenstand, und daher ist es auch größer als dieser.

Die Bilder der Concavlinsen. Bei Convexlinsen erleidet die Wellenfläche in der Mitte der Linse die stärkste Verzögerung, bei einer concaven Linse wird sie dagegen

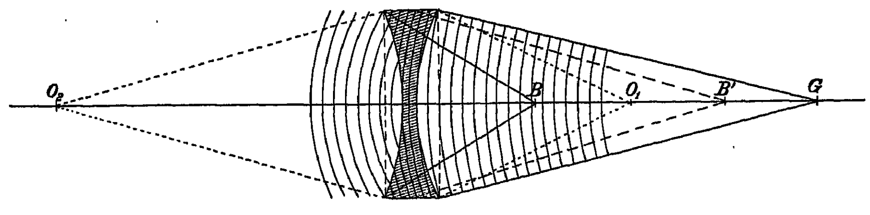


Fig. 299.

am Rande mehr verzögert und ist daher beim Austritte aus der Linse convex gekrümmt; die Strahlen treten also immer divergent aus. (Fig. 299.) Wir können die biconcave Linse als eine planparallele Glasplatte auffassen, in welcher zwei calottenförmige Ausschnitte durch Luft ersetzt worden sind. Den Vorsprung, den die Wellenfläche in diesen Lufträumen dem dickeren Rande gegenüber erfährt, berechnen wir

aus der Höhe der beiden Calotten mit den Halbmessern r_1 und r_2, ihre Summe ist $(n-1)\left(\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_2}\right)\frac{y^2}{2}$. Diese Verschiebung entspricht wieder der Differenz zwischen dem Wege der Randstrahlen und jener, die längs der Achse fortschreiten; sie beträgt $\left(\frac{1}{b}-\frac{1}{g}\right)\frac{y^2}{2}$, weil alle Wellenflächen nach derselben Seite gekrümmt sind und daher für die Verschiebung nur die Differenz der Calottenhöhen in Betracht kommt. Daraus folgt

$$(n-1)\left(\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_2}\right)=\frac{1}{f}=\frac{1}{b}-\frac{1}{g} \text{ oder } \frac{1}{b}=\frac{1}{f}+\frac{1}{g}.$$

Da für einen sehr entfernten Gegenstand $\frac{1}{g}=0$ gesetzt werden muss, so erscheint das Bild desselben im Brennpunkte auf derselben Seite der Linse; wenn der Gegenstand bis in die Brennweite heranrückt, so ist $b=\frac{f}{2}$; das Bild erscheint also im Halbierungspunkte der Brennweite.

Die Construction des aufrechten imaginären Bildes ist nach Fig. 300 folgende. Wir verlegen wie bei den Convexspiegeln das mit der Brennweite construierte Quadrat

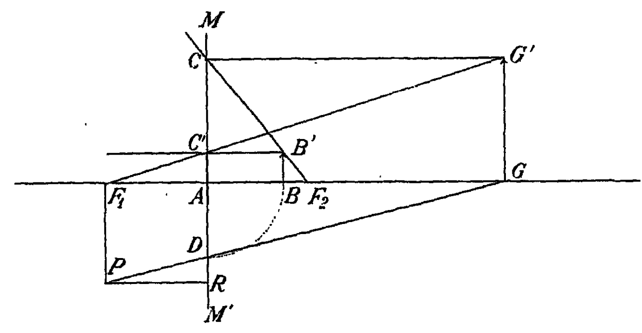


Fig. 300.

in den entgegengesetzten Quadranten und finden den Bildpunkt B von G, indem wir die Strecke AD, welche die Gerade GP von AM' abschneidet, von A nach rechts auftragen. Zum Bildpunkt von G' gelangen wir dadurch, dass wir die Gerade $G'C$ parallel zur Achse ziehen; der in dieser Richtung die Linse treffende Strahl verlässt dieselbe in der Richtung F_2C. Der nach dem Brennpunkte F_1 gerichtete Strahl pflanzt sich von C' an parallel zur Achse fort und divergiert also mit dem Strahl F_2C; die beiden Strahlen scheinen aber vom Punkte B' auszugehen, und daher ist BB' das imaginäre Bild von GG'. Es ist ferner $\frac{BB'}{GG'}=\frac{BB'}{AC}=\frac{BF_2}{AF_2}=\frac{f-b}{f}=\frac{b}{g}$, denn aus $\frac{1}{b}=\frac{1}{f}+\frac{1}{g}$ folgt $\frac{b}{g}=1-\frac{b}{f}=\frac{f-b}{f}$.

Infolge dieser verschiedenen Beziehungen von Gegenstand und Bild bei convexen und concaven Linsen lassen sich diese beiden Arten von Linsen sofort durch den bloßen Anblick unterscheiden, ohne dass man deren geometrische Form untersucht. In der concaven Linse erscheinen alle dahinter befindlichen Gegenstände stets verkleinert und aufrecht. Ähnliche Bilder liefern die convexen Linsen in keiner Stellung. Dagegen erscheinen in denselben die dahinter befindlichen Gegenstände aufrecht und vergrößert, wenn sie der Linse hinreichend nahe sind. Innerhalb einer gewissen Entfernung bildet sich kein deutliches Bild, und bei größeren Entfernungen vom Auge bemerkt man ein umgekehrtes verkleinertes Bild.

Das menschliche Auge.

Der Augapfel hat ungefähr kugelförmige Gestalt und ruht in der mit reichen Fettlagern ausgekleideten Augenhöhle. Der zum Gehirne führende Sehnerv *N* (Fig. 301) nähert sich dem Augapfel von der Nasenseite. Sechs nach verschiedenen Richtungen ausgespannte Muskeln *M* binden den Augapfel an die Augenhöhle und verleihen ihm eine jedes andere Kugelgelenk weit übertreffende Beweglichkeit. Die äußere Umgebung des Auges bilden die mannigfaltig geformten Brauen und die zuckenden Augenlider mit den Wimperhaaren; ihre Stellungen verleihen in Verbindung mit dem rastlos hin und herrollenden Augensterne der Physiognomie mehr als irgend ein anderer Gesichtstheil das charakteristische Gepräge. Die beim festen Blick scharf markierte Achsenrichtung des Auges zeigt uns deutlicher als jede Bewegung, wohin die Aufmerksamkeit des Beobachters gerichtet ist.

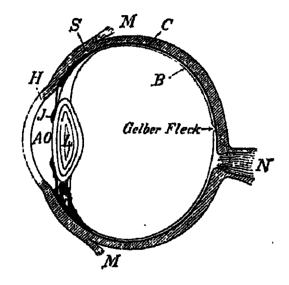


Fig. 301.

Das Innere des Augapfels umschließen der Reihe nach die weiße, harte und undurchsichtige „Faser- oder Sehnenhaut" *S* — Sclerotica —, welche sich vorne über dem Augensterne stärker wölbt und hier in die durchsichtige „Hornhaut" *H* übergeht. Unter dieser befindet sich die „Aderhaut" *C* — Chorioidea —, an welche sich an der Vorderseite die „Regenbogenhaut" oder Iris *I* anschließt, und dann folgt, durch eine dunkle Pigmentschichte von ihr getrennt, die „Netzhaut". Vom „blinden Fleck", wo der Sehnerv in das Auge eintritt, ausgehend verbreiten sich die Nervenfasern über die Netzhaut *B* und stehen mit den zwischen der Netzhaut und der Aderhaut wie parallele Pfähle aufgestellten „Zäpfchen" und „Stäbchen" in Verbindung. Letztere scheiden den „Sehpurpur" aus, ein rothes, lichtempfindliches und im Dunklen regenerierbares Pigment, das die von der Außenwelt eindringenden Lichtbilder vorübergehend, aber doch länger festhält, als der Eindruck selbst andauert.

Der optische Apparat des Auges besteht aus der unter der Cornea befindlichen „vorderen Augenkammer" *A*, die mit einer wässerigen Flüssigkeit gefüllt ist. Im Hintergrunde derselben befindet sich die Regenbogenhaut mit der „Pupille" oder dem „Sehloch" *O*, das sich bei großer Lichtstärke unwillkürlich zusammenzieht und dadurch die Helligkeit im Innern des Auges vermindert. Im Dunkeln tritt dagegen eine Erweiterung ein, wodurch das Sehvermögen durch Steigerung der Helligkeit der Lichtbilder wesentlich unterstützt wird. An der Grenze zwischen der vorderen Augenkammer und dem vom „Glaskörper" ausgefüllten übrigen Theile befindet sich die „Linse" *L*. Sie besteht aus zwiebelartig ineinander geschalteten, durchsichtigen Schalen und ist auf der inneren Seite des Auges stärker gekrümmt als nach vorne. Die vordere Augenkammer, die Linse und der Glaskörper wirken zusammen wie eine einzige Convexlinse, deren optischer Mittelpunkt 0·48 mm vor der hinteren Krümmungsfläche der Linse liegt. Man bezeichnet das auf diesen Punkt als Linsenstellung bezogene schematische Auge als das „reducierte Auge". Die Linse spielt im Auge eine ähnliche Rolle, wie die Gehörknöchelchen im Ohre, sie bildet gewissermaßen die Reguliervorrichtung, die den sonst starren Apparat verschiedenen Anforderungen schmiegsam anpasst. Während wir beim Fernrohr oder beim Mikroskop die Länge

verändern oder andere Linsen einsetzen müssen, um sie neuen Verhältnissen anzupassen, wird im Auge durch den ringförmigen „Ciliarmuskel" die Krümmung der Linse und damit auch ihre Brennweite geändert, um von Gegenständen, die sich in sehr verschiedenen Entfernungen vom Auge befinden, auf der Netzhaut klare Bilder zu erzielen. Darin besteht das Accommodationsvermögen des Auges. Hat die Linse von Anfang an oder durch oftmalige Contraction eine zu stark gewölbte Gestalt angenommen, so lässt sich die so verminderte Brennweite vergrößern, indem man vor das Auge eine Concavlinse gibt, welche die zu stark gekrümmte Wellenfläche mehr ebnet und das zu nahe an der Linse entstehende Bild auf die Netzhaut verlegt. Die mit einer solchen Deformation der Linse verbundene Kurzsichtigkeit oder Myopie kann also durch concave Augengläser corrigiert werden. Die bei zunehmendem Alter sich häufig einstellende Presbyopie oder Weitsichtigkeit hat darin ihren Grund, dass das Bild infolge einer zu großen Brennweite hinter die Netzhaut fällt und kann daher für geringere Distanzen durch eine vorgesetzte Convexlinse corrigiert werden, weil dann die Strahlen bereits convergent in das Auge eintreten. Bei den sogenannten Starbrillen muss die Krümmung des Augenglases die Wirkung der ganzen Linse ersetzen und daher stärker gekrümmt sein. Das normale Auge hat eine deutliche Sehweite von ungefähr 25 cm und kann bis auf 10 bis 15 cm gut accommodieren. Wenn man das Kreuz im dunklen Felde (Fig. 302) mit dem rechten Auge aus einer Entfernung von etwa 30 cm

Fig. 302.

betrachtet, so erhält man den Eindruck, dass das ganze übrige Feld dunkel sei; die vom weißen Kreise in das Auge dringenden Lichtstrahlen müssen also auf eine Stelle des inneren Auges fallen, an der sie keine Empfindung hervorzurufen vermögen. Wäre der Kreis schwarz auf weißem Grunde, so würden wir ihn ebensowenig sehen, wie den weißen auf dunklem Grunde. Das Verschwinden des Kreises ist also nicht etwa eine Folge davon, weil wir an dieser Stelle nur die weiße oder irgend eine andere Farbe nicht wahrnehmen, sondern wir vermögen dort überhaupt keinen Lichteindruck wahrzunehmen. Da bei diesem Versuche der Kreis auf dem Bilde rechts vom Kreuze liegen muss, so liegt die unempfindliche Stelle im Auge, wo der Sehnerv in das Auge eintritt, auf der Nasenseite. Am stärksten ist das Empfindungsvermögen in der Umgebung der „fovea centralis" im „gelben Fleck".

Die mit jeder Strahlenbrechung verbundene Farbenzerstreuung ist in der Linse schon dadurch wesentlich vermindert, dass die Brechung auf viele nahezu parallele Schichten der Linse vertheilt ist. Trotzdem erhalten wir

infolge der Farbenzerstreuung von einer weißen Lichtquelle wie bei jeder Convexlinse die Bilder der stärker oder schwächer gebrochenen Strahlen an verschiedenen Orten. (Fig. 303.) In der Ebene *R* werden die rothen Strahlen ein scharfes Bild geben, in der Ebene *V* dagegen die violetten. In der Mitte *W* vereinigen sich die Bilder verschiedenfarbiger Strahlen freilich nicht

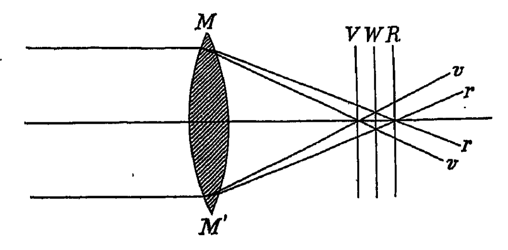


Fig. 303.

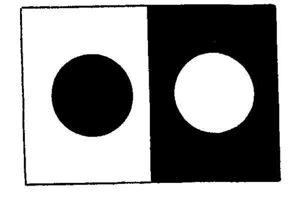


Fig. 304.

mehr auf einen Punkt, sondern zu einer größeren kreisförmigen, aber weißen Fläche. Solche Gesichtsbilder vermögen also nicht jede noch so kleine Einzelheit wiederzugeben. Darauf beruht die Erscheinung der Irradiation, die darin besteht, dass ein helles Feld auf dunklem Grunde größer erscheint als ein gleichgroßes dunkles Feld auf hellem Grunde (Fig. 304), denn die von den hellen Stellen der Figur ausgehenden Strahlen werden als kleine Flächen abgebildet und daher auf das benachbarte dunkle Feld übergreifen, die Wirkung der dunklen Stellen wird aber die der hellen nicht merklich beeinflussen.

Das Sehen. Wie eine gewisse Zeit verstreichen muss, um zwei nacheinander an das Ohr gelangende Laute getrennt aufzufassen, so muss auch ein Lichtreiz ungefähr 0·1 Secunde andauern und eine bestimmte Stärke erreichen, um wahrgenommen und von einem anderen unterschieden zu werden; dieser dauert aber einige Zeit hindurch an, auch wenn die Ursache inzwischen aufgehört hat. Wenn sich ein leuchtender Punkt rasch im Kreise herum bewegt, so erhalten wir sehr bald den Eindruck einer continuierlichen Kreislinie. Das setzt voraus, dass der Lichteindruck an einer bestimmten Stelle noch nicht vergangen ist, während der Lichtpunkt bereits wieder dahin zurückgekehrt ist. Soll also eine periodisch wiederkehrende Bewegung den Eindruck einer unveränderlichen Erscheinung machen, so darf die Periode nicht mehr als etwa 0·1 Secunde in Anspruch nehmen. Trifft der erneute Lichtreiz nicht mehr genau mit derselben Phase der Bewegung zusammen, so wird sich das Gesammtbild in der Weise verschieben, wie die einzelnen Phasen der periodischen Bewegung aufeinander folgen. Darauf beruhen die verschiedenen stroboskopischen Erscheinungen. Beobachtet man den Schatten einer schwingenden Stimmgabel, so vermag man ihre einzelnen Schwingungen nicht zu unterscheiden, da sie zu rasch wechseln. Wenn wir aber den Schatten durch ein periodisch intermittierendes Licht hervorrufen, das die Stimmgabel immer in derselben Schwingungsphase beleuchtet, so wird sie in der entsprechenden Phasenstellung zu verbleiben scheinen. Wenn aber das intermittierende Licht den Schwingungen der Stimmgabel gegenüber einen solchen Phasenunterschied hat, dass erst nach einer Secunde wieder dieselben Phasen zusammentreffen, so scheint die Stimmgabel in einer Secunde eine einzige Schwingung auszuführen, weil wir in jeder Secunde der Reihe nach alle Phasen zu sehen bekommen und daher dieselben in ihren Einzelheiten verfolgen können.

In ähnlicher Weise fließen auch die Bilder in ein langsam veränderliches Continuum zusammen, wenn sich die einzelnen Momentbilder nahezu decken und die Veränderungen nur schrittweise erfolgen, wie es bei der sogenannten Wundertrommel und beim Kinematographen der Fall ist.

Das Aufrechtsehen besteht in der richtigen Beurtheilung der räumlichen Beschaffenheit unserer Umgebung aus den Gesichtsempfindungen. Diese Orientierung erfolgt in erster Linie durch die Muskelempfindungen beim Einstellen der Augachsen. Die Lage des bei aufrechter Körperstellung „unten“ befindlichen Fußbodens gibt uns den wichtigsten

Anhaltspunkt zur Beurtheilung der Lage der übrigen Dinge in der Umgebung, auch wenn sich der Körper zufällig in einer anderen Lage befindet. Die Stellung des Bildes auf der Netzhaut und der Gang der Strahlen im Auge ist für die Orientierungsfrage vollständig gleichgiltig.

Das einfache und räumliche Sehen. In beiden Augen entstehen in der nächsten Umgebung des gelben Fleckes gleichstimmig congruente Bilder, die aber infolge der gegenseitigen Entfernung beider Augen von etwa 7 cm kleine Unterschiede aufweisen. Werden die Augen gewaltsam aus ihrer normalen Stellung gebracht, so fallen verschiedene Punkte des Bildes auf den gelben Fleck und wir sehen dann zwei gegeneinander verschobene Bilder unserer Umgebung. Durch die parallele Verschiebung der Augen gelingt es aber, immer dieselbe Bildstelle mit dem gelben Flecke und damit auch die beiden Bilder zur Deckung zu bringen; bei näherliegenden Objecten ist dies allerdings nur möglich, wenn die Augenachsen etwas convergent gestellt werden. Trotzdem erhält das rechte Auge noch immer ein etwas verschiedenes Bild als das linke. Fig. 305 zeigt die Kanten eines Ikosaëders, links wie es das linke, und rechts

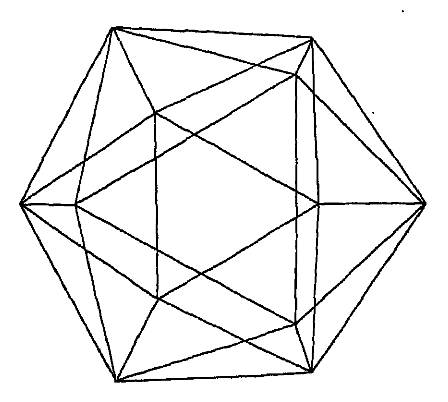
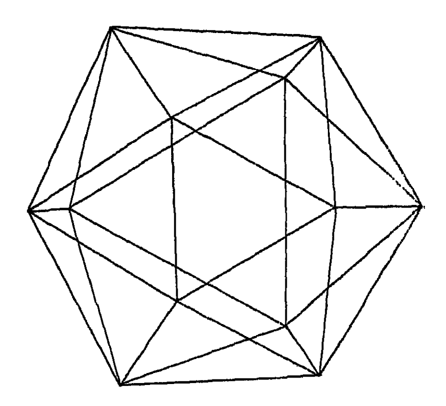



Fig. 305.

wie es das rechte Auge in der normalen Sehweite sieht. Sollen diese beiden Figuren wieder den Eindruck eines einzigen räumlich ausgedehnten Körpers machen, so müssen wir dafür sorgen, dass in jedem Auge von dem für dasselbe bestimmten Bilde dieselbe Stelle auf den gelben Fleck fällt. Dies kann man auch dadurch erreichen, dass man senkrecht zur Zeichenfläche zwischen beide Figuren ein Blatt Papier so hält, dass jedes Auge nur ein Bild sieht. Uebt man hierauf mit Daumen und Mittelfinger durch die Augenlider im inneren Augenwinkel einen leisen Druck auf den Augapfel aus, so vereinigen sich in diesem Falle beide Bilder und der Körper erscheint räumlich. Beim Brewster'schen „Stereoskop" (Fig. 306) werden von beiden Figuren imaginäre Bilder erzeugt, deren Strahlen aus demselben Orte im Raume zu kommen scheinen, und so erhalten wir den Eindruck eines räumlichen Gebildes. Diese Verlegung der imaginären Bilder erzielt man, indem die beiden Hälften einer biconvexen Linse mit den Kanten gegeneinander gestellt werden, wodurch sich beide Bilder so verschieben, dass sie sich in der Symmetrieebene decken.

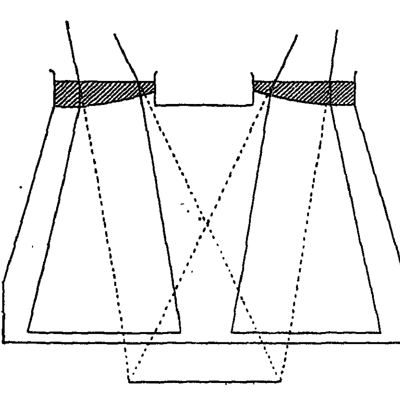


Fig. 306.

Die Entfernung der einzelnen Gegenstände beurtheilen wir außer durch das räumliche Sehen auch noch nach anderen Gründen. Um einen Gegenstand einfach zu sehen, müssen wir beiden Augachsen solche Richtungen geben, dass das Bild beiderseits auf den gelben Fleck fällt. Dies erreichen wir bei größeren Distanzen durch bloße Parallelverschiebung der Augachsen. Nur bei geringeren Distanzen müssen die Augachsen convergent gestellt werden, und dann

gibt uns die zu dieser ungewöhnlichen Einstellung nöthige Muskelarbeit einen Maßstab, wie nahe der Körper sein muss, um mit dieser Anstrengung die Bilder zur Deckung zu bringen. Wir entnehmen also die „Perspective“ unserer Umgebung in erster Linie dem Verlaufe mancher Linien im Bilde, also dem Inhalte des im Auge entstandenen Bildes, ferner den Muskelempfindungen, die sich einstellen, wenn wir die einzelnen Punkte der Umgebung scharf ins Auge fassen. Bei näherliegenden Gegenständen orientiert uns auch die Muskelempfindung, welche die Accomodation verursacht. Diese bezeichnet man als „focale Perspective“, weil sie von der Lage des Brennpunktes (Focus) der Linse abhängt. Einen weiteren Maßstab zur Beurtheilung der Entfernung liefert uns die „scheinbare Größe“ von Gegenständen, deren „absolute Größe“ uns anderswoher bekannt ist. Unter der „scheinbaren Größe“ versteht man nämlich den Winkel, welchen die vom Auge aus an die Endpunkte der zu messenden Strecke gezogenen Geraden miteinander einschließen. Die scheinbare Größe der Sonne oder des Mondes wird daher in Graden, Minuten und Secunden angegeben. Wir entnehmen also unsere Entfernung von einem Orte auch daraus, dass wir die dort befindlichen Menschen mehr oder weniger „klein“ sehen. Bei noch größeren Entfernungen kommt hauptsächlich die „Luftperspective“ in Betracht, bei der die Helligkeitsvertheilung in der Atmosphäre eine große Rolle spielt; da dieselbe im allgemeinen in der Nähe des Horizontes zunimmt und den entferntesten Punkten einen gleichmäßigen hellen Farbenton verleiht, so ist diese Erscheinung ein Zeichen von sehr großer Entfernung.

Die optischen Instrumente.

Im Auge sind alle den Linsenbildern anhaftenden Fehler zwar nicht absolut vermieden, weil dies die optischen Gesetze überhaupt nicht zulassen, aber so stark reduciert, dass es hinsichtlich seiner vielseitigen Brauchbarkeit alle optischen Instrumente weit übertrifft. Seine Leistungen können aber dadurch noch wesentlich gesteigert werden, dass wir ihm statt der Objecte, geeignete Bilder derselben vorführen. Der optische Apparat des Auges ist seiner Natur nach darauf eingerichtet, divergente Strahlen zu einem wirklichen Bilde auf der Netzhaut zu vereinigen; wir können daher nicht nur reelle, sondern auch imaginäre Bilder benützen, um den „Gesichtswinkel“ oder die „scheinbare Größe“ sehr ferner oder sehr kleiner Objecte so weit zu vergrößern, dass ihre Bilder oder einzelne Theile derselben, die früher wegen ihrer Kleinheit auf der Netzhaut in eine einzige Helligkeitsempfindung zusammengeflossen sind, getrennt zur Darstellung kommen. Dies zu erreichen, ist der gemeinsame Zweck aller optischen Instrumente.

Das Sonnenmikroskop und der Projectionsapparat haben den Zweck, von einem Objecte mit Hilfe einer convexen Linse ein vergrößertes, wirkliches Bild herzustellen, das entweder auf einer weißen Wand oder auf einem transparenten Schirme aufgefangen wird. Um ein vergrößertes, wirkliches Bild zu erhalten, muss das Object außerhalb der Brennweite aufgestellt, derselben aber um so näher gebracht werden, je bedeutender die Vergrößerung sein soll. Bei sehr starken Vergrößerungen muss das Object sehr gut beleuchtet sein, weil sonst das Bild wegen zu geringer Helligkeit nicht gut bemerkbar wäre. Die hiezu nöthige Lichtmenge liefert beim Sonnenmikroskope das Sonnenlicht und beim Projectionsapparate irgend eine künstliche Lichtquelle, meistens wird jetzt dazu das elektrische Bogenlicht verwendet. Bei figuralen Darstellungen ist nicht nur darauf zu achten, dass das Bild nicht umgekehrt erscheine, sondern es darf auch nicht mit dem symmetrischen Bilde verwechselt werden.

Die Photographie. Das bei den eben erwähnten Apparaten nur vorübergehend entworfene Lichtbild lässt sich auf chemischem Wege dauernd festhalten, wenn es zur Belichtung einer „lichtempfindlichen“, also einer „photo-

graphischen“ Platte verwendet und auf derselben „entwickelt“ wird. Das dabei aus den Silbersalzen ausgeschiedene metallische Silber bildet dann eine schwarze, undurchsichtige Schichte, welche die hellen Bildstellen dunkel und die dunkeln hell widergibt. Dieses so erhaltene „Negativ“ kann hierauf erst zur Herstellung eines transparenten „positiven“ Bildes auf Glas oder der „Photographie“ auf Papier verwendet werden. Die photographische Abbildung hat insbesonders darum für die Wissenschaft ungeheuere Bedeutung, weil der Beobachter nicht mehr darauf angewiesen ist, alle feineren Einzelheiten einer oft rasch vorübergehenden Erscheinung momentan aufzufassen, sondern an dem photographisch festgehaltenen Bilde auch noch Dinge wahrnehmen kann, die momentan seiner Aufmerksamkeit entgangen wären. Ein mit dem Objecte verbundener und mit ihm abgebildeter Maßstab gestattet, alle Theile des Objectes mit der Größe der Längeneinheit zu vergleichen, und so Messungen vorzunehmen, die sonst fast unmöglich wären. Dabei kann sogar noch die zur Ausführung einer genauen und sachgemäßen Darstellung aufgewendete Mühe vielen anderen zugänglich gemacht werden, die nicht in der Lage sind, ähnliche Vorbereitungen zu treffen. In diesem Sinne hat sich die Photographie bereits zu einer wertvollen Hilfswissenschaft aller Naturwissenschaften, insbesondere der Astronomie, der Naturgeschichte und der Medicin ausgebildet. (Vergleiche: Chemie, Seite 150.)

Das einfache Mikroskop oder die Lupe. Nähern wir einen Gegenstand einer convexen Linse so weit, dass er sich innerhalb der Brennweite befindet, so erhalten wir ein imaginäres aufrechtes Bild, dessen Wahrnehmbarkeit durch die Fähigkeit des Auges bedingt ist, auch stark divergierende Strahlen auf der Netzhaut zu einem Bilde zu vereinigen. Wenn wir einen

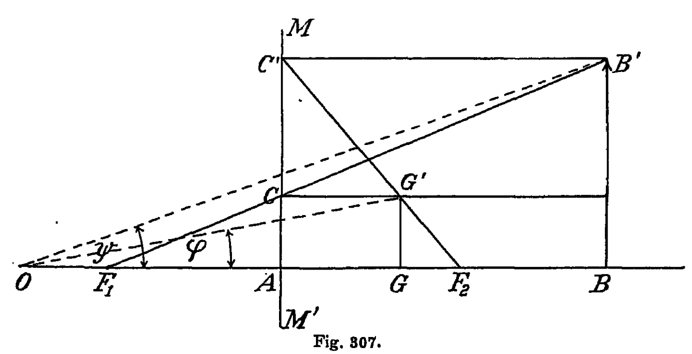


Fig. 307.

Gegenstand unter der Lupe betrachten, so geben wir dem Auge eine solche Stellung, dass das imaginäre Bild in der deutlichen Sehweite auftritt. Würden wir das Object ohne die Lupe betrachten, so würden wir es unwillkürlich in die deutliche Sehweite bringen. Die Vergrößerung, die es also durch die Lupe erfährt, entspricht demnach dem Verhältnisse der beiden Winkel ψ und φ, unter welchen uns einerseits das imaginäre Bild, und andererseits der Gegenstand in der deutlichen Sehweite erscheinen würde. (Fig. 307.) Die Vergrößerung $\frac{\psi}{\varphi}$ entspricht also nicht genau dem Werte der Verhältnisse $\frac{BB'}{GG'} = \frac{AC'}{GG'} = \frac{AF_2}{GF_2} = \frac{f}{f-g}$. Sie ist daher nur annähernd gleich dem Verhältnisse der deutlichen Sehweite zur Brennweite der Linse.

Derartige Berechnungen haben auch darum wenig Wert, weil sich die Größen f und g nicht leicht mit hinreichender Genauigkeit bestimmen lassen. Viel einfacher lässt sich die Vergrößerung bestimmen, indem man z. B. ein eng liniertes Papier nicht nur durch die Lupe, sondern auch außerhalb derselben betrachtet. Zählt man ab, wie viele Linien des nicht vergrößerten Papieres auf die des vergrößerten entfallen, so ergibt sich daraus unmittelbar das Vergrößerungsverhältnis. Nach Fig. 308 wäre es 27 : 4, also nahezu gleich 7.

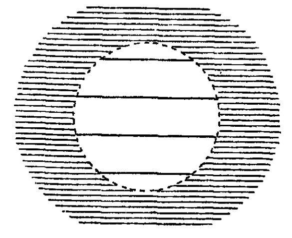


Fig. 308.

Schon Seneca machte auf die vergrößernde Wirkung des in einem kugeligen Gefäße eingeschlossenen Wassers aufmerksam, und im elften Jahrhunderte benützte bereits der Araber Alhazen linsenförmige Glasstücke, um sehr kleine Gegenstände deutlicher zu sehen. Als endlich im 13. Jahrhunderte durch Armati in Florenz die Brillen entdeckt worden waren, entwickelte sich allmählich die Brillenschleiferei zu einem eigenen Industriezweige, und damit war auch die Vorbedingung zur Entdeckung der Lupe gegeben. Das erste einfache Mikroskop scheint im Jahre 1590 aus der Schleiferei des Brillenmachers Jansen in Middelburg hervorgegangen zu sein, und 1612 hat sich auch Galilei mit einem Mikroskope beschäftiget. Im Jahre 1625 benützte bereits Francesco Stelluti die Lupe zu mikroskopischen Untersuchungen des anatomischen Baues der Honigbiene, und Marcello Malpighi beobachtete um diese Zeit bereits die Circulation des Blutes in den Schwimmhäuten des Frosches.

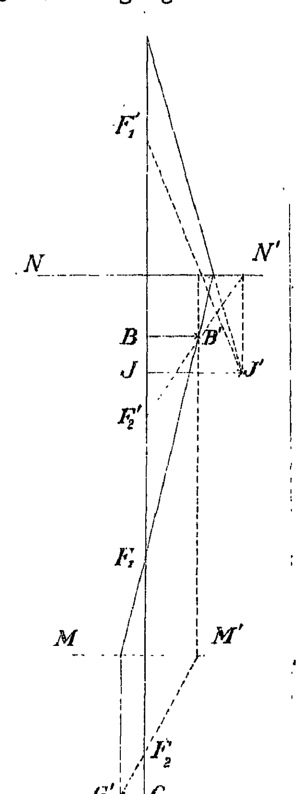


Fig. 309.

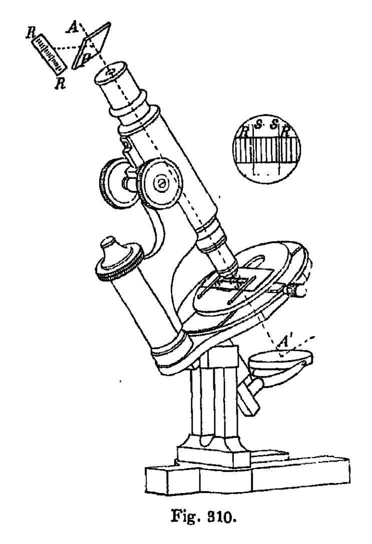


Fig. 310.

Beim **zusammengesetzten Mikroskope** (Fig. 309) erzeugt man zuerst mit dem O b j e c t i v e, einer Linsencombination MM' von sehr kleiner Brennweite, ein wirkliches, bereits stark vergrößertes Bild BB' und betrachtet

dasselbe durch das „Ocular" NN' als Lupe, ohne also das wirkliche Bild zuerst auf einem Schirme aufzufangen. Die Vergrößerung des Objectes durch das Objectiv ist so groß wie das Verhältnis von Bild und Gegenstandsweite, und dieses wirkliche Bild erfährt noch eine Vergrößerung durch das Ocular, die ungefähr dem Verhältnisse der deutlichen Sehweite des Beobachters zur Brennweite des Oculars gleich ist. Daraus kann man einigermaßen die Vergrößerung abschätzen, während das genauere Verhältnis auch in diesem Falle experimentell gemessen wird.

Zu diesem Zwecke gibt man zwischen Ocular und Auge eine ebene Glasplatte P (Fig. 310), welche die Achse AA' unter einem Winkel von 45^0 schneidet, und beobachtet durch dieselbe zugleich einen in der deutlichen Sehweite befindlichen Maßstab RR und eine auf dem Objecttische liegende Scala SS, deren Verhältnis zu ersterem bekannt ist; die sich im Gesichtsfelde gegenseitig deckenden Bilder gestatten, das Verhältnis gleich großer Strecken innerhalb und außerhalb des Mikroskopes festzustellen.

Ungleich wichtiger als die Kenntnis der Vergrößerung eines Mikroskopes ist bei wissenschaftlichen Untersuchungen die Messung sehr kleiner Objecte. Um eine solche durchzuführen, muss der Objecttisch mit einer Mikrometerschraube versehen sein, welche außerordentlich kleine Verschiebungen des Tisches sammt dem Objecte auszuführen gestattet. Haben wir einen Maßstab, bei dem z. B. ein Millimeter in 1000 Theile getheilt ist, so können wir feststellen, welche Drehung wir mit der Mikrometerschraube

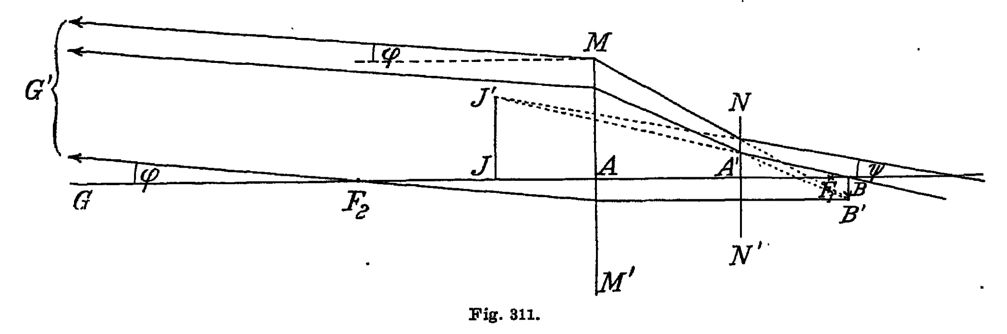


Fig. 311.

ausführen müssen, um das Object um 0·001 mm zu verschieben. Spannt man an jener Stelle im Mikroskope, wo das wirkliche Bild des Objectes entsteht, zwei Spinnfäden aus, die sich mitten im Gesichtsfelde rechtwinklig schneiden, so wird dieses Fadenkreuz auch im Gesichtsfelde des Oculars erscheinen, und wir können mittels der Mikrometerschraube feststellen, um wie viel wir das Object verschieben müssen, damit der Durchschnittspunkt des Fadenkreuzes die am Objecte zu messende Strecke beschreibt.

Die zusammengesetzten Mikroskope gewannen erst zu Beginn des 19. Jahrhunderts an Bedeutung, seit es gelungen ist, die bei zunehmender Vergrößerung immermehr hervortretende Farbenzerstreuung zurückzudrängen und achromatische Linsen herzustellen. Sehr große Verdienste um die Verbesserung des Mikroskopes erwarben sich Fraunhofer in München und Chevalier in Paris.

Das holländische oder Galilei'sche Fernrohr. Die erste authentische Nachricht von einem, als neue Erfindung anerkannten „Instrumente, um weit zu sehen", stammt aus dem Jahre 1608, in welchem der Middelburger

Brillenschleifer Hans Lipperheim das Privilegium erhielt, solche Fernrohre anzufertigen. Die Erfindung wird aber auch dem schon erwähnten Jansen zugeschrieben, der die ersten Mikroskope herstellte. Im Jahre 1609 überreichte Galilei ein solches Fernrohr dem Dogen von Venedig und ließ im Jahre 1618 ein Fernrohr für beide Augen anfertigen, das man als das erste „Binocle" ansehen kann. Diese Fernrohre bestehen aus einer dem Objecte zugewendeten Convexlinse, dem Objectiv MM' (Fig. 311), und einer innerhalb seiner Brennweite aufgestellten Concavlinse NN', dem Ocular. Die vom äußersten Punkte des Gegenstandes G' kommenden Strahlen schließen mit der Achse einen Winkel φ ein, den wir als die scheinbare Größe des Gegenstandes bezeichnen können. Diese Strahlen würden sich in nächster Nähe des Brennpunktes F_1 des Objectivs vereinigen, wenn ihnen nicht die eingeschaltete Concavlinse NN' eine divergente Richtung geben würde, weshalb sie aus J' zu kommen scheinen. Sie schließen daher nach dieser Brechung mit der optischen Achse einen kleineren Winkel ψ ein, als die nach F_1 convergierenden Strahlen. Der Winkel ψ bleibt aber trotzdem noch größer als φ, und das Verhältnis $\frac{\psi}{\varphi}$ gibt die Vergrößerung an. Dieser nur auf einer Seite der optischen Achse gezeichnete Strahlengang wiederholt sich rings um dieselbe, ohne dass die Strahlen innerhalb des Instrumentes die Achse durchschneiden; daher erhalten wir bei dieser Linsencombination stets aufrechte Bilder. Zu diesem großen Vorzuge kommt noch ein zweiter, dass dieses Fernrohr sehr kurz ist und daher ein großes Gesichtsfeld hat; auch ist die Farbenzerstreuung relativ gering, weil die Strahlen zweimal, aber nach entgegengesetzten Richtungen gebrochen werden. Dagegen ist die Vergrößerung im Vergleiche zum später erfundenen Keplerschen Fernrohre ziemlich klein. Es eignet sich also besonders zu den sogenannten „Feldstechern", die trotz der binocularen Construction keinen großen Raum einnehmen.

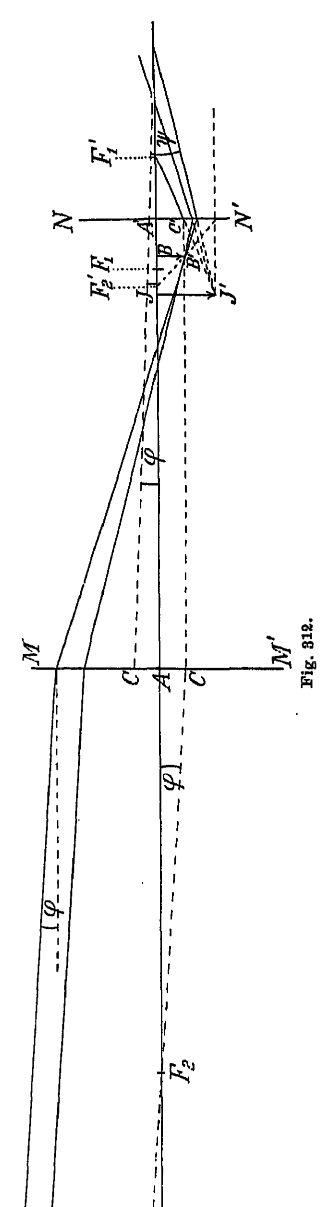


Fig. 312.

Das Kepler'sche oder astronomische Fernrohr. Kepler beschreibt in seiner 1610 in Prag erschienenen „Dioptrik" ein von ihm erfundenes und im Jahre 1617 von Scheiner ausgeführtes Fernrohr, das aus zwei Convexlinsen besteht; die dem Objecte zugewendete MM' (Fig. 312) soll eine möglichst große Brennweite haben und wird zur Erzeugung eines wirklichen, umgekehrten und verkleinerten

Bildes BB' in der Nähe ihres Brennpunktes verwendet, die andere NN' erzeugt von diesem wirklichen Bilde ein imaginäres vergrößertes Bild JJ'. Die Vergrößerung $\frac{\psi}{\varphi}$ ist annäherungsweise gleich dem Verhältnisse v der beiden Brennweiten. Sie wird aber besser experimentell in der Weise gemessen, dass man das Fernrohr nach einem fernen Objecte richtet, das in viele gleiche Theile getheilt ist, z. B. nach einem mit Ziegeln gedeckten Dache und beobachtet, wie viele Theile außerhalb des Fernrohres auf eine Längeneinheit im Gesichtsfelde des Fernrohres entfallen.

Da das wirkliche Bild BB' einer convexen Linse umgekehrt ist, so ist auch das imaginäre Bild JJ' im Ocular umgekehrt, und jede in unserem Gesichtsfelde wahrnehmbare Bewegung eines Objectes erfolgt daher im Gesichtsfelde des Fernrohres nach der entgegengesetzten Seite. Diese Umstellung der Gegenstände wie auch der Bewegungen im Gesichtsfelde dieses Fernrohres ist für den Astronomen keineswegs störend, da die Lage und Bewegung der Sterne nur aus der Stellung des Fernrohres ermittelt wird. Das Kepler'sche Fernrohr kommt auch bei der Gauss-Poggendorf'schen Spiegelablesung, sowie beim Nivellieren in Anwendung. Behufs genauerer Einstellung bringt man in demselben ein Fadenkreuz an.

Um im Gesichtsfelde dieses Fernrohres ein aufrechtes Bild zu erhalten, hat zuerst der Kapuzinermönch Schyrl aus dem Kloster Rheit im Jahre 1645 das vom Objectiv erzeugte umgekehrte Bild zur Erzeugung eines zweiten wirklichen Bildes verwendet, das infolgedessen wieder aufrecht erscheint, und dann erst durch das Ocular vergrößert wird. Die Umkehrung wird aber meist nicht durch eine einzige, sondern durch mehrere Convexlinsen hervorgerufen, die in ungefähr gleichen Distanzen zwischen Objectiv und Ocular eingeschaltet werden. Dadurch wird aber dieses sogenannte „terrestrische“ Fernrohr sehr verlängert und verliert einigermaßen die Schärfe der Umrisse.

Das Teleskop besteht aus einem Concavspiegel, der ein wirkliches Bild des Objectes in der Nähe seines Brennpunktes erzeugt, das durch ein Ocular wesentlich vergrößert wird. Das erste Spiegelteleskop stellte in Italien Zucchi im Jahre 1616 her. Das vom Astronomen Herschel im Jahre 1789 verfertigte lieferte eine 6400fache Vergrößerung. Im Gegensatze zu den Linsenfernrohren oder „Refractoren“ bezeichnet man die Spiegelfernrohre auch als „Reflectoren“. Durch die Fortschritte in der Erzeugung schlierenfreier Gläser von bestimmter Brechbarkeit und größeren Dimensionen haben die Refractoren größere Bedeutung gewonnen.

Physikalische Optik.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes ist im Vergleiche zu der des Schalles so groß, dass man bei den ältesten Messungen der letzteren die Ankunft des optischen Signales mit Recht als den Augenblick der Explosion betrachten konnte. Bevor man noch daran dachte, dass das Licht überhaupt eine gewisse Zeit zur Fortpflanzung benöthige, hatte man aber bereits eine Erscheinung bemerkt, die nur der richtigen Deutung bedurfte, um diese Geschwindigkeit auch zu messen. Picard, der Prior des Klosters Rillé, ein Schüler Gassendis, der die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles bestimmt hatte, lernte auf seinen Reisen behufs Ausführung einer neuen Gradmessung den dänischen Astronomen Olaf Römer kennen und

berief ihn nach Paris, wo dieser mit dem Astronomen Cassini die Verfinsterungen der Jupitertrabanten beobachtete; dabei machten beide die Wahrnehmung, dass deren Verfinsterungen nicht immer nach gleichen Zeitintervallen erfolgen. Diese Abweichungen vom regelmäßigen Verlaufe änderten sich aber mit den Jahreszeiten der Erde, und daraus zogen die Beobachter sofort den Schluss, dass dieselben nur eine Folge der Bewegung der Erde seien. Während aber Cassini diese Auffassung bald wieder aufgab, verfolgte sie Olaf Römer desto beharrlicher und legte seine Ansicht im Jahre 1675 der Pariser Akademie vor. Huygens und Newton schlossen sich alsbald dieser Auffassung an, und damit war auch die allgemeine Anerkennung dieser so fundamentalen Erkenntnis gerettet. In den Stellungen E_1 und E_2 (Fig. 313)

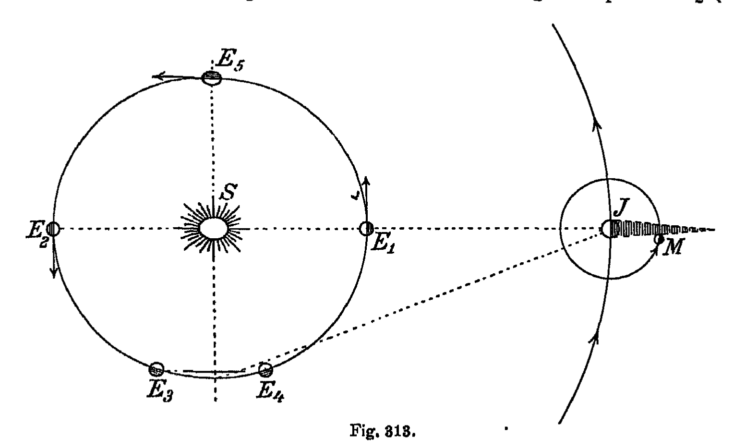


Fig. 313.

bewegt sich die Erde in einer zur Geraden EJ senkrechten Richtung und befindet sich daher mehrere Tage lang nahezu in derselben Entfernung vom Planeten Jupiter J. In der Quadratur, also in den Stellungen E_3 und E_5, ändert sich die Entfernung der Erde vom Jupiter von Tag zu Tag um eine namhafte Strecke. Während eines Zeitraumes von $42^h 28' 35'' = 152915''$, die ein Jupitermond M braucht, um einen Umlauf zu vollenden, vermehrt oder vermindert sich die Entfernung der Erde vom Jupiter so weit, dass die Verfinsterung um 14″ später oder früher eintritt. Den Weg $E_3 E_4$, welchen die Erde in diesen 152915″ macht, legt also das Licht in 14″ zurück und hat daher eine 152915 : 14, also 10900mal größere Geschwindigkeit als die Erde in ihrer Bahn. Da diese in einer Secunde durchschnittlich einen Weg von etwa 29·7 km zurücklegt, so beträgt die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes 10900 . 2970000, also in runder Zahl $3 . 10^{10} \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$.

Zum gleichen Resultate kam der englische Astronom James Bradley durch seine Untersuchungen über die Aberrationserscheinung des Lichtes. Wenn man nämlich die Stellung eines Fixsternes am Himmel zu verschiedenen Zeiten des Jahres bestimmt, so erhält man nicht immer denselben „Ort“; seine Stellungen beschreiben vielmehr im Laufe eines Jahres im allgemeinen kleine Ellipsen und weichen von der Mittellage bis 20″ ab. Auch diese Erscheinung muss eine Folge der Erdbewegung sein, da sie sich periodisch mit der Stellung der Erde zur Sonne, und zwar für alle Fixsterne im gleichen Sinne ändert. Bradley erklärte diese Erscheinung in einer aus dem Jahre

1727 stammenden Abhandlung aus der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes. $E_1 E_2 S_2 S_1$ (Fig. 314) stelle das Fenster eines in Bewegung befindlichen Wagens vor. Wenn sich der Wagen um die Strecke $E_1 E_2$ im Sinne des Pfeiles fortbewegt, während ein in der Nähe vertical niederfallender Regentropfen gerade die Strecke $S_2 E_2$ zurücklegt, so empfangen wir, im Wagen sitzend, den Eindruck, als hätte der Tropfen die Diagonale $S_2 E_1$ beschrieben; dabei entspricht die Richtung, aus welcher der Tropfen kommt, der Richtung, nach der sich der Wagen bewegt. $E_1 E_2$ und $S_2 E_2$

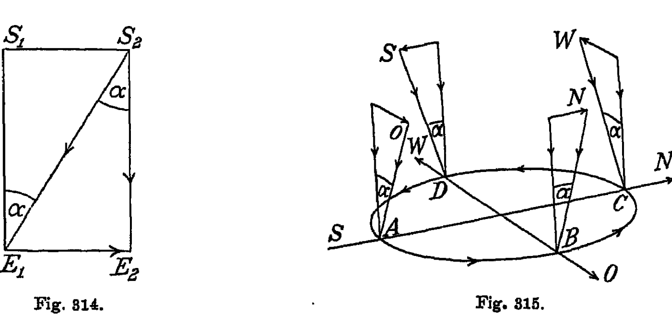


Fig. 314. Fig. 315.

sind zwei zu gleicher Zeit zurückgelegte Wege und verhalten sich daher wie die Geschwindigkeiten des Wagens und des Tropfens, wenn derselbe unterdessen seine Geschwindigkeit nicht ändert. Wenn wir auf der Bahn $ABCD$ (Fig. 315) im Kreise herumfahren, während der Regen auf uns fortwährend vertical niederfällt, so erhalten wir demnach den Eindruck, dass der Regen der Reihe nach aus Osten, Norden, Westen und endlich aus Süden kommt. Die Richtung, aus welcher der Regen zu kommen scheint, gibt uns also unsere eigene Bewegungsrichtung, und der Winkel α das Verhältnis der Geschwindigkeit beider Bewegungen an. Der Winkel α zwischen der

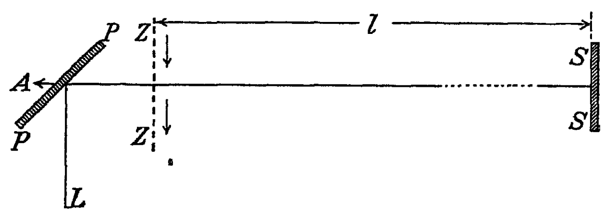


Fig. 316.

wirklichen und scheinbaren Bewegungsrichtung heißt Aberrationswinkel. Da dieser für die von den Fixsternen auf die Erde fallenden Strahlen in gewissen Stellungen 20 Secunden beträgt, so ist also:

$$\text{tang } 20'' = 0{\cdot}000096 = 297{\cdot}10^4 : v = v' : v,$$

wenn v' die Geschwindigkeit der Erde auf ihrer Bahn und v die des Lichtes bedeutet. Letztere ist daher $v = 297{\cdot}10^4 : 0{\cdot}000096$, also in runder Zahl gleich $3 \,.\, 10^{10} \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$.

Endlich gelang es im Jahre 1849 dem französischen Physiker Fizeau, die Geschwindigkeit des Lichtes zu messen, ohne kosmische Bewegungen zu Hilfe zu nehmen. Die von der Lichtquelle L (Fig. 316) ausgehenden Strahlen wurden an der Glasplatte P reflectiert und gelangten so, eine Lücke

des Zahnrades Z passierend, nach dem 8633 m entfernten Spiegel S. Von diesem abermals reflectiert, giengen sie abermals durch dieselbe Lücke des Zahnrades und gelangten, die Platte P durchsetzend, in das Auge A des Beobachters. Das mit 720 Zähnen und ebensovielen Lücken versehene Zahnrad musste 12·6 mal pro Secunde gedreht werden, damit der Strahl nach Zurücklegung von 2 . 8633 m statt der Lücke einen Zahn vorfand und durch denselben abgeschnitten wurde. Um bei einer Umdrehung in der Secunde eine Lücke durch den benachbarten Zahn zu ersetzen, waren $\frac{1}{2.720}'' = 0{\cdot}000694''$ nöthig, also bei 12·6 Umdrehungen 0·0000551''. Da in dieser Zeit ein Weg von 1726600 cm zurückgelegt wurde, so muss sich das Licht mit einer Geschwindigkeit von 1726600 : 0·0000551, also von etwa $3 . 10^{10} \frac{cm}{sec}$ fortgepflanzt haben. Foucault vermochte sogar im Jahre 1862 diese Geschwindigkeit in den Räumen eines Laboratoriums zu messen, indem er dabei rotierende Spiegel verwendete.

Aus allen diesen Messungen geht hervor, dass sich das Licht ungefähr mit derselben Geschwindigkeit ausbreitet, wie elektrische Wellen, und daraus zog man den berechtigten Schluss, dass es dasselbe Medium sei, welches beide Arten von Wellenbewegungen fortpflanzt.

Refraction und Dispersion. Ist uns die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes im luftleeren Raume bekannt, so können wir aus dem Brechungs-

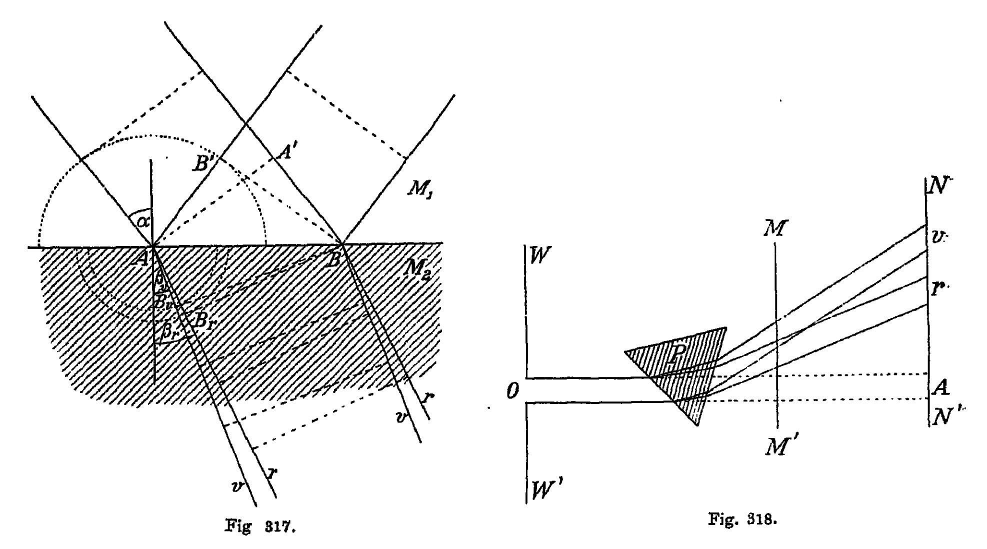


Fig 317. Fig. 318.

index auch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes in anderen durchsichtigen Medien bestimmen, da derselbe nach der Wellenlehre dem Quotienten der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten in beiden Medien gleich ist. Übrigens hat Foucault im Jahre 1854 die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes im Wasser unmittelbar gemessen und denselben Wert bekommen, der sich auch nach der Wellenlehre ergibt. Damit war zugleich die Emissionshypothese widerlegt, der zufolge sich das Licht wie die Massen nach dem ersten Newton'schen Gesetze geradlinig fortbewegt und in ein dichteres Medium tiefer eindringt. Der Wellenlehre zufolge ist aber die Fortpflanzungs-

geschwindigkeit im Wasser eine kleinere. Ferner muss nach der Wellenlehre jede Brechung mit Farbenzerstreuung oder Dispersion verbunden sein. Michelson hat nämlich im Jahre 1885 gezeigt, dass sich im stark brechenden Schwefelkohlenstoff die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des rothen Lichtes zu der des blauen Lichtes wie 1·014 : 1 verhält. Während sich also (Fig. 317) die bei A ankommende Welle im ersten Medium bis B' fortpflanzt, dringen im neuen Medium die violetten Strahlen nur bis B_v und die rothen bis B_r vor. Infolgedessen müssen von der Stelle B Wellenflächen ausgehen, die mit dem Einfallslothe verschiedene Brechungswinkel wie z. B. β_v und β_r einschließen. Der violette Strahl wird also stärker gebrochen und von der ursprünglichen Richtung mehr abgelenkt als der rothe.

Das Spectrum. Um die Farbenzerstreuung zu beobachten, lässt man durch die Öffnung O einer undurchsichtigen Wand WW' (Fig. 318) einen schmalen Lichtstrahl in ein dunkles Zimmer eintreten und lenkt ihn durch ein Prisma von seiner Richtung ab. Stellen wir knapp hinter dem Prisma einen Schirm MM' auf, so bemerken wir, dass der weiße Lichtfleck, der

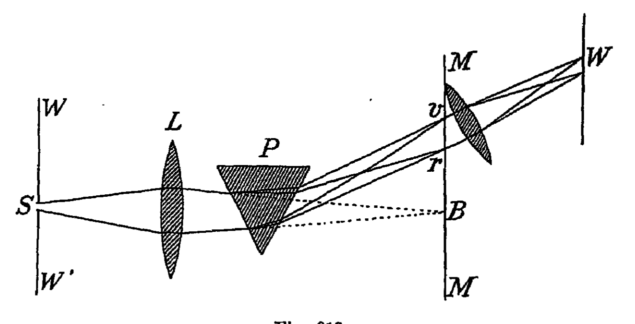


Fig. 319.

früher bei A an die Wand fiel, auf der unteren Seite einen rothen, und auf der oberen einen blau-violetten Rand bekommt. Je weiter wir uns mit dem Schirme vom Prisma entfernen, desto schmäler wird der noch weiße Streifen, der die farbigen Ränder trennt, und schließlich löst sich auf dem Schirme NN' das ganze Lichtbild in einen langgezogenen Streifen auf, an dem wir mit freiem Auge der Reihe nach die Farben dunkelroth, hochroth, orange, gelb, grün, hellblau, dunkelblau und violett zu unterscheiden vermögen. Alle diese Farben treten in sehr kräftigen und lebhaften Tönen auf, und daher bezeichnen wir sie als „gesättigt". Lassen wir das Licht durch eine sehr schmale Spalte S (Fig. 319) in das Zimmer eindringen, so können wir von dieser Spalte mittels einer Sammellinse L auf dem Schirme MM' in B ein scharfes Bild entwerfen. Wenn wir in der Nähe der Linse das Prisma aufstellen, so wird das Bild der Spalte viel breiter und zeigt wieder die oben angeführten Farben. Dieses durch die Farbenzerstreuung auseinandergezogene Bild der Lichtspalte nennen wir ein Spectrum. Durch eine zweite zwischen Prisma und Schirm gestellte Sammellinse können wir die verschieden gefärbten Strahlen wieder vereinigen und erhalten dann ein weißes Bild W der Spalte auf dem Schirm NN'. Newton stellte auf Grund dieser Erscheinung zuerst die Behauptung auf, dass das weiße Licht aus allen übrigen Lichtarten zusammengesetzt sei und durch das Prisma in seine einfachen Bestandtheile zerlegt werde. Vereinigen wir nur einen Theil des vollständigen Spectrums $v—r$ auf dem

zweiten Schirme NN', so erhalten wir nicht mehr ein weißes Lichtbild, noch auch eine der früheren Spectralfarben, sondern die weniger gesättigten Mischfarben. Eine Mischfarbe, die alle Farben enthält, welche bei der Herstellung einer anderen Mischfarbe ausgeschlossen wurden, bezeichnet man als deren Complementärfarbe. Die äußersten Farben des Spectrums, roth und violett, geben mit Ausschluss der übrigen als Mischfarbe „Purpur".

Verwenden wir zur Herstellung des Spectrums mehrere Prismen mit demselben brechenden Winkel und in derselben Stellung, aber aus verschiedenem Material, so erhalten wir verschiedene Spectra. Fig. 320a zeigt die Spectra eines solchen Flintglas-, eines Crownglas- und eines aus Wasser bestehenden Prismas. Diese Spectra sind nicht nur verschieden

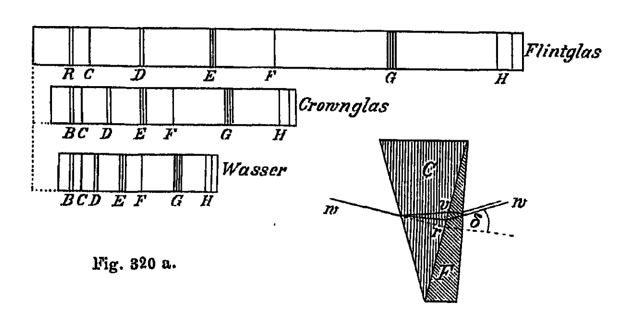


Fig. 320 a.

Fig. 320 b.

lang, sondern auch verschieden stark von der ursprünglichen Richtung der Strahlen abgelenkt. Wir können also durch ein Flintglasprisma mit viel kleinerem brechenden Winkel ein gleichlanges Spectrum erzeugen, wie mit einem Crownglasprisma mit größerem Winkel. Wir sind daher in der Lage, die von einem Crownglasprisma C hervorgerufene Farbenzerstreuung durch ein Flintglasprisma F mit kleinerem Winkel aufzuheben, ohne dass deshalb der Deviationswinkel δ verschwindet (Fig. 320b). Damit erhalten wir ein Prisma, das zwar eine Ablenkung δ der Strahlen, aber keine merkliche Farbenzerstreuung hervorruft, also ein achromatisches Prisma. Bedeuten δ_v und δ_r die Diviationswinkel für die violetten und rothen Strahlen beim ersten Prisma und δ_v' und δ_r' die für das zweite Prisma, so werden beide ein gleich langes Spectrum erzielen, wenn

$$\delta_v - \delta_r = \delta_v' - \delta_r' \text{ oder wenn } \delta_v - \delta_v' = \delta_r - \delta_r'.$$

Die Ablenkung, welche die violetten Strahlen erfahren, wird demnach dieselbe sein müssen, wie die der rothen, und dann werden auch alle übrigen färbigen Lichtstrahlen das achromatische Prisma nahezu in parallelen Richtungen verlassen und sich so zu weißem Lichte vereinigen. Die wichtigste Anwendung der achromatisierten Prismencombination sind die „achromatischen Linsen", die also aus einer stärker gekrümmten Convexlinse aus Crownglas und einer schwächer gekrümmten concaven Linse aus Flintglas bestehen. (Fig. 321). Da sich beim zusammengesetzten Mikroskop das vom Objectiv erzeugte wirkliche Bild in relativ großer Entfernung von der Linse bildet und bei den Keplerschen Fernrohren Objective von möglichst großer Brennweite in Anwendung kommen, so treten auch die von den verschiedenfärbigen Strahlen

Fig. 321.

entworfenen Bilder nicht genau an derselben Stelle auf, wenn das Objectiv nicht achromatisch ist.

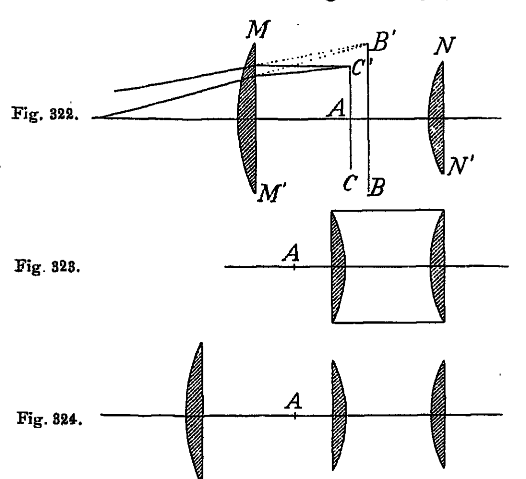


Fig. 322. Fig. 323. Fig. 324.

Dieser Schwierigkeit begegnete der geschickte Optiker Campani schon lange vor der Entdeckung der achromatischen Prismen in der Weise, dass er die Strahlen vor ihrer Vereinigung zum wirklichen Bilde durch eine Sammellinse, durch das sogenannte Collectivglas MM' gehen ließ (Fig. 322) und so die verschiedenfärbigen Bilder einander näher brachte. Dabei wird das Bild allerdings verkleinert, das Gesichtsfeld aber erweitert. Diese beiden planconvexen Linsen, die beide ihre convexe Seite dem Objectiv zuwenden, bilden zusammen in gemeinsamer Fassung das sogenannte „Campanische Ocular". Beim „Ocular von Ramsden" (Fig. 323) wenden sich die beiden planconvexen Linsen die convexe Seite zu und das von der Objectivlinse erzeugte Bild kommt in A, also außerhalb desselben zustande. Bei manchen Instrumenten werden auch beide Ocularformen miteinander vereinigt (Fig. 324); das Fadenkreuz wird in solchen Instrumenten immer in A, also dort eingestellt, wo das wirkliche Bild auftritt.

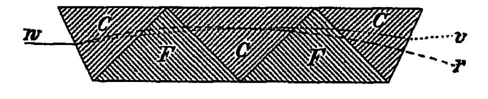


Fig. 325.

Wie wir die Farbenzerstreuung eines Crownglasprismas durch ein Flintglasprisma aufheben konnten, ohne die Ablenkung zu vermeiden, so können wir andererseits auch die Ablenkung eines Flintglasprismas verhindern, erhalten aber einen Lichtstrahl mit Farbenzerstreuung. Eine solche aus einer Reihe von Flint- und Crownglasprismen bestehende Combination bezeichnet man als „geradsichtiges" Prisma. Der Strahlengang in demselben entspricht der Fig. 325.

Beugung (Diffraction) und Interferenz. Die Erscheinung der Beugung des Lichtes, deren genauere Erforschung zur Widerlegung der Emissionstheorie des Lichtes führte, hat P. Francesco Grimaldi in Bologna entdeckt und bereits im Sinne der Wellentheorie aufgefasst. Seine Beobachtungen wurden erst nach seinem Tode im Jahre 1665 bekannt, aber wenig beachtet, und es dauerte lange Zeit, ehe die Wellentheorie zum Durchbruche kam. Noch im 19. Jahrhunderte kämpfte der englische Arzt und Physiker Thomas Young trotz allen Scharfsinnes erfolglos gegen die angeblich von Newton vertretene Emissionstheorie, bis es endlich dem genialen französischen Physiker Augustin Jean Fresnel gelang, durch eine exactere Ausführung und mathematische Behandlung der Grimaldi'schen Versuche die entscheidende Wendung herbeizuführen. Mit diesen wissenschaftlich mustergiltigen Untersuchungen, welche in die Jahre 1815—1826 fallen, beschloss er sein junges Leben. Um das Wesentlichste von diesen Erscheinungen kennen zu lernen,

kann man die entsprechenden Versuche nach Mach in folgender Weise anstellen. Durch eine Spalte, welche etwa 0·5 mm breit ist, dringt ein Sonnenstrahl in ein dunkles Zimmer und erzeugt auf einem 5—6 m entfernten Schirme einen beleuchteten Streifen. Wenn wir in der halben Entfernung einen zur Spalte parallelen Draht von 1—2 mm Durchmesser ausspannen, so müsste sein Schatten einen einfachen dunklen Streifen auf dem Schirme erzeugen, wenn nicht die Erscheinung der Beugung oder Diffraction auftreten und infolgedessen das Licht, sich um den Draht herum drehend, in den Schattenraum eindringen würde. Ersetzen wir den Draht durch einen Schirm, in dem sich zwei parallele Spalten von der Breite $^1/_4$ mm in einem Abstande von 1 mm befinden, so erhalten wir auf dem 5 m entfernten Schirme, wenn wir das Licht nur durch eine von beiden Spalten eintreten lassen, in der Mitte einen Lichtstreifen, der viel breiter ist als $^1/_4$ mm, und diese Ausbreitung des Lichtes ist wieder nur eine Folge der Beugung. Wenn wir den Lichtstrahl durch beide Spalten des Schirmes eintreten lassen, so zeigen sich in dem hellen Lichtstreifen auch dunkle Streifen, und damit ist gezeigt, dass „Licht zu Licht hinzugefügt die Helligkeit vermindern kann“. Das ist eine Folge der Interferenz.

Betrachten wir diese Erscheinung vom Standpunkte der Wellenlehre, so können wir daraus die Länge der Lichtwellen ermitteln. (Fig. 326.)

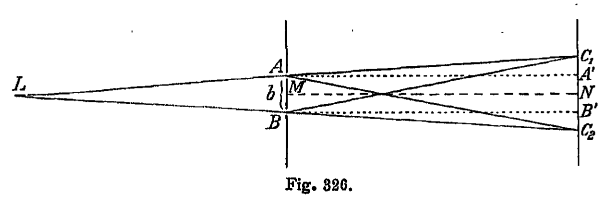


Fig. 326.

Jede von der Lichtquelle L ausgehende Kugelwelle erreicht die beiden Spalten A und B gleichzeitig, und passiert sie daher mit derselben Phase. Von A aus pflanzen sich infolge der Beugung die Lichtstrahlen nicht nur nach C_1, sondern auch nach C_2 fort, kommen aber in diesen Punkten infolge der verschiedenen Weglänge nicht mit derselben Phase an. Setzen wir die Entfernung $MN = l$, $C_1N = C_2N = y$ und $AB = b$, so ist

$$\overline{BC}_1^2 = l^2 + \left(y + \frac{b}{2}\right)^2 \text{ und } \overline{AC}_1^2 = l^2 + \left(y - \frac{b}{2}\right)^2.$$

Daher ist $\overline{BC}_1^2 - \overline{AC}_1^2 = (BC_1 + AC_1)\ (BC_1 - AC_1) = 2\,by$. Da l mehrere m lang ist, während sowohl b als y kaum einen mm ausmachen, so können wir mit hinreichender Annäherung $BC_1 + AC_1 = 2\,l$ setzen, und erhalten $BC_1 - AC_1 = \frac{b}{l} \cdot y = \lambda$, d. h. wir können annehmen, dass die Differenz dieser beiden Weglängen der Wellenlänge λ des Lichtes gleich sei, wenn sich die von A und B ausgehenden Strahlen bei C_1 nächst dem Punkte N das erstemal wieder ohne Phasendifferenz einstellen. Um also die Wellenlänge zu messen, brauchen wir nur die Entfernung y des nächsten hellen Streifens von N, nebst b und l zu messen. Dabei stellt sich naturgemäß dieselbe Schwierigkeit ein, wie bei der Bestimmung des Brechungsindex; denn wir erhalten auch hier nicht einfach helle und dunkle Linien, sondern färbige Streifen. Wenn wir aber zu diesem Versuche nur das rothe, gelbe oder blaue Licht des Spectrums verwenden, so stellen sich nur helle

und dunkle Streifen ein, und letztere geben uns Stellen an, wo sich die Strahlen um ein ungerades Vielfaches von halben Wellenlängen unterscheiden, während die an den hellen Stellen zusammenkommenden Wellen um gerade Vielfache halber Wellenlängen verschoben sind. Da die dunklen Streifen bei violettem Lichte etwas näher zusammenrücken als bei rothem Lichte, so muss auch die Wellenlänge des violetten Lichtes kleiner sein als die des rothen. Für $b = 1$ mm und $l = 5000$ mm ergibt sich beim rothen Lichte $y = 3{\cdot}5$ und daher ist $\lambda = \frac{1}{5000} \,.\, 3{\cdot}5 = 0{\cdot}0007$ mm. Drücken wir diese Längen in $\mu\mu = 1$ Milliontel Millimeter aus, so erhalten wir für gewisse Farbentöne des Sonnenspectrums, die Fraunhofer mit den Buchstaben des Alphabetes bezeichnet hat, die folgenden Wellenlängen. Mit Hilfe derselben und der uns bekannten Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes $c = 3 \,.\, 10^{10} \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$ können wir nach der Formel $\lambda = c\,T = \frac{c}{n}$ auch die Schwingungszahlen n ermitteln, welche der Tabelle beigefügt sind.

	λ	n		λ	n
Äußerstes Roth A	760 $\mu\mu$	395.10^{12}	Grün E . . .	527 $\mu\mu$	570.10^{12}
Hochroth B . . .	687 „	437.10^{12}	Cyanblau F.	486 „	617.10^{12}
Orange	625 „	480.10^{12}	Violett H . .	395 „	758.10^{12}
Gelb D	589 „	509.10^{12}			

Da der erste helle Streifen beim Interferenzversuche den Schirm in einer um so größeren Entfernung vom Mittelpunkte trifft, je mehr die betreffende Farbe vom violetten Ende des Spectrums entfernt ist, so bilden die hellen Farbenstreifen miteinander ein Spectrum, dessen violettes Ende der in der Mitte auftretenden weißen Linie am nächsten steht. Dieses Spectrum hat also die wichtige Eigenschaft, dass die Entfernungen der einzelnen Farben von der Mittellinie ihrer Wellenlänge proportional sind. Man bezeichnet es daher im Gegensatze zu den durch Prismen hervorgerufenen Spectren als ein normales Spectrum. Vergleichen wir es nämlich mit dem eines Flintglasprimas (Fig. 327), dessen Fraunhofer'sche Linien A und H dieselbe Distanz haben, so sehen wir, dass die übrigen Linien mitunter stark voneinander abweichen.

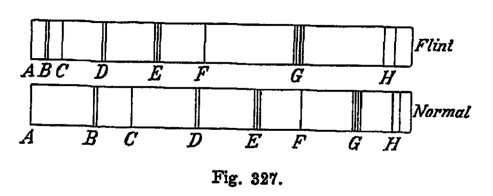


Fig. 327.

Ein derartiges, nur von zwei Spalten hervorgerufenes Spectrum würde aber sehr lichtschwach sein. Man kann die Wirkung dadurch wesentlich verstärken, dass man die Zahl der Spalten pro mm wesentlich erhöht, weil dann auch von einer dritten und vierten Spalte das Licht desselben Farbentones mit der gleichen Phasendifferenz an derselben Stelle eintrifft. Fraunhofer erzeugte zuerst (1821) solche Spectra durch Drahtgitter, und Rowland hat durch Ritzen von Glasplatten mit Diamanten Gitter hergestellt, bei welchen Tausende von Linien auf einen cm entfallen. Um ein helles Gitterspectrum zu erhalten, erzeugt man mit einer Sammellinse von großer Brennweite auf einem Schirme das scharfe Bild einer sehr dünnen Spalte, und stellt das Glasgitter zwischen Linse und Schirm auf.

und dunkle Streifen ein, und letztere geben uns Stellen an, wo sich die Strahlen um ein ungerades Vielfaches von halben Wellenlängen unterscheiden während die an den hellen Stellen zusammenkommenden Wellen um gerade Vielfache halber Wellenlängen verschoben sind. Da die dunklen Streifen bei violettem Lichte etwas näher zusammenrücken als bei rothem Lichte, so muss auch die Wellenlänge des violetten Lichtes kleiner sein als die des rothen. Für $b = 1$ mm und $l = 5000$ mm ergibt sich beim rothen Lichte $y = 3{\cdot}5$ und daher ist $\lambda = \frac{1}{5000} \cdot 3{\cdot}5 = 0{\cdot}0007$ mm. Drücken wir diese Längen in $\mu\mu = 1$ Milliontel Millimeter aus, so erhalten wir für gewisse Farbentöne des Sonnenspectrums, die Fraunhofer mit den Buchstaben des Alphabetes bezeichnet hat, die folgenden Wellenlängen. Mit Hilfe derselben und der uns bekannten Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes $c = 3 \cdot 10^{10} \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$ können wir nach der Formel $\lambda = c\,T = \frac{c}{n}$ auch die Schwingungszahlen n ermitteln, welche der Tabelle beigefügt sind.

	λ	n		λ	n
Äußerstes Roth A	760 $\mu\mu$	$395 \cdot 10^{12}$	Grün E . . .	527 $\mu\mu$	$570 \cdot 10^{12}$
Hochroth B . . .	687 „	$437 \cdot 10^{12}$	Cyanblau F .	486 „	$617 \cdot 10^{12}$
Orange	625 „	$480 \cdot 10^{12}$	Violett H . .	395 „	$758 \cdot 10^{12}$
Gelb D	589 „	$509 \cdot 10^{12}$			

Da der erste helle Streifen beim Interferenzversuche den Schirm in einer um so größeren Entfernung vom Mittelpunkte trifft, je mehr die betreffende Farbe vom violetten Ende des Spectrums entfernt ist, so bilden die hellen Farbenstreifen miteinander ein Spectrum, dessen violettes Ende der in der Mitte auftretenden weißen Linie am nächsten steht. Dieses Spectrum hat also die wichtige Eigenschaft, dass die Entfernungen der einzelnen Farben von der Mittellinie ihrer Wellenlänge proportional sind. Man bezeichnet es daher im Gegensatze zu den durch Prismen hervorgerufenen Spectren als ein normales Spectrum. Vergleichen wir es nämlich mit dem eines Flintglasprimas (Fig. 327) dessen Fraunhofer'sche Linien A und H dieselbe Distanz haben, so sehen wir, dass die übrigen Linien mitunter stark voneinander abweichen.

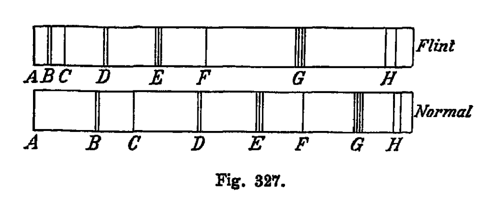


Fig. 327.

Ein derartiges, nur von zwei Spalten hervorgerufenes Spectrum würde aber sehr lichtschwach sein. Man kann die Wirkung dadurch wesentlich verstärken, dass man die Zahl der Spalten pro mm wesentlich erhöht, weil dann auch von einer dritten und vierten Spalte das Licht desselben Farbentones mit der gleichen Phasendifferenz an derselben Stelle eintrifft. Fraunhofer erzeugte zuerst (1821) solche Spectra durch Drahtgitter, und Rowland hat durch Ritzen von Glasplatten mit Diamanten Gitter hergestellt, bei welchen Tausende von Linien auf einen cm entfallen. Um ein helles Gitterspectrum zu erhalten, erzeugt man mit einer Sammellinse von großer Brennweite auf einem Schirme das scharfe Bild einer sehr dünnen Spalte, und stellt das Glasgitter zwischen Linse und Schirm auf.

Farben dünner Blättchen. Schon Newton hatte seine Aufmerksamkeit der Erscheinung zugewendet, dass farblose Flüssigkeiten gerade in sehr dünnen Schichten wie z. B. die Seifenblasen unmittelbar vor dem Zerspringen kräftige Färbungen erhalten, welche nicht als Farbe der Flüssigkeit betrachtet werden können. Ähnliche Farbenspiele bemerkt man, wenn sich in einem Stück Glas oder in einem Krystall ein sehr feiner Riss gebildet hat, oder wenn man eine Convexlinse auf eine ebene Glasplatte drückt. Die in diesen Fällen auftretenden sogenannten Newton'schen Farbenringe sind ebenfalls auf Interferenzerscheinungen zurückzuführen. Gelangt der Strahl LA (Fig. 328) an die Oberfläche einer planparallelen Platte, so wird er theils reflectiert, theils gebrochen. Der reflectierte Strahl schlägt zuerst den Weg AC und nach abermaliger Reflexion bei C den Weg CB ein, um nach einer Brechung vom Lothe in B wieder in das frühere Medium zurückzukehren. In B trifft er mit dem Strahle $L'B$ zusammen, der hier nicht nur gebrochen, sondern auch in der Richtung BN reflectiert wird. Diese beiden Strahlen interferieren und werden sich gegenseitig stärken oder schwächen, jenachdem ihre Phasendifferenz einer geraden oder ungeraden Anzahl von halben Wellenlängen näher steht. Während nämlich der Strahl LA den Weg ACB zurücklegen muss, braucht der Strahl $L'B$ nur die Strecke $A'B$ zu beschreiben, und

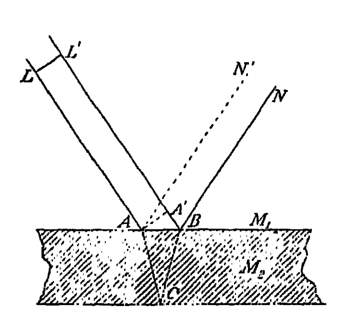


Fig. 328.

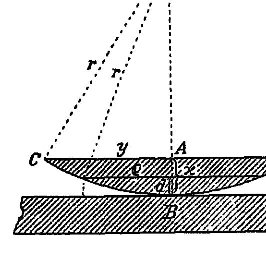


Fig. 329.

daher hängt die Phasendifferenz in erster Linie von der Dicke der Platte, ferner vom Material derselben und endlich auch vom Neigungswinkel ab, welchen der Strahl mit dem Einfallslothe bildet. Außerdem erleidet der Strahl $L'B$ bei der Reflexion in B eine Phasenverschiebung um eine halbe Wellenlänge, weil er hier an einem dichteren Medium reflectiert wird, während dies in C nicht der Fall ist. Dieselbe Erscheinung muss sich auch zeigen, wenn der Lichtstrahl eine sehr dünne Luftschichte passiert, die zwischen zwei Glasplatten eingeschlossen ist, wie es der Fall ist, wenn wir eine planconvexe Linse auf eine ebene Glasplatte legen (Fig. 329). Bei dieser Anordnung tritt die Phasenverschiebung infolge der Reflexion am dichteren Medium an der unteren Grenze der Luftschichte ein. Die interferierenden Strahlen werden sich also in der Mitte, wo sich die beiden Glasflächen berühren, gegenseitig tilgen, da hier die Luftschichte selbst keine Phasendifferenz hervorruft, und die Reflexion am Glase eine Phasendifferenz von einer halben Welle bewirkt. In der Entfernung ρ vom Mittelpunkte, wo die Dicke der Luftschichte $d = \frac{\rho^2}{2r}$ gesetzt werden kann, stelle sich der erste helle Ring ein, wenn wir die Berührungsstelle im einfärbigen Lichte betrachten; hier muss also der Lichtstrahl beim zweimaligen Passieren der Luftschichte eine Phasenverschiebung von einer halben Wellenlänge erfahren haben, um dieselbe Phase zu erhalten, wie der an der oberen Grenze der Luftschichte reflectierte Strahl. Daher ist $2d = \frac{\rho^2}{r} = \frac{\lambda}{2}$ und $\lambda = 2\frac{\rho^2}{r}$. Ist ferner r der Krümmungsradius der Convexlinse, also $r = \frac{x^2+y^2}{2x}$, so folgt für den ersten hellen Ring $\lambda = \frac{4\rho^2 x}{x^2+y^2}$. Für jeden folgenden Ring nimmt die Dicke der Luftschichte zu, und damit wächst auch jedesmal der Phasenunterschied um eine ganze Wellenlänge.

Spectralanalyse.

Wenn man mit Hilfe des Sonnenlichtes ein Spectrum erzeugt, indem man von einer sehr dünnen Spalte ein scharfes Bild entwirft und dasselbe mit Hilfe eines Prismas ablenkt, so bemerkt man in demselben viele dunkle, zur brechenden Kante des Primas parallele Linien, welche zuerst der Münchner Optiker Fraunhofer im Jahre 1814 als eine dem Sonnenlichte eigenthümliche Erscheinung erkannte. Er bezeichnete die auffallendsten derselben mit den großen Buchstaben des lateinischen Alphabets von A bis H, und damit sind ganz bestimmte, durch einen charakteristischen Farbenton ausgezeichnete Stellen des Spectrums festgestellt. In der Tabelle für die Wellenlänge haben wir für einige solche Linien die Wellenlänge angegeben. Wir haben ferner darauf hingewiesen, dass die gegenseitige Entfernung dieser Linien von der Natur des brechenden Prismas abhängt, und es lässt sich sogar für einzelne Gase und Flüssigkeiten die Lage dieser Linien in ihrer Abhängigkeit von der chemischen Beschaffenheit des Prismas gesetzmäßig feststellen. Manche Farbstoffe wie z. B. Fuxin haben die Eigenschaft, die Strahlen von gewissen Farben durch ihre Lösungen derart abzulenken,

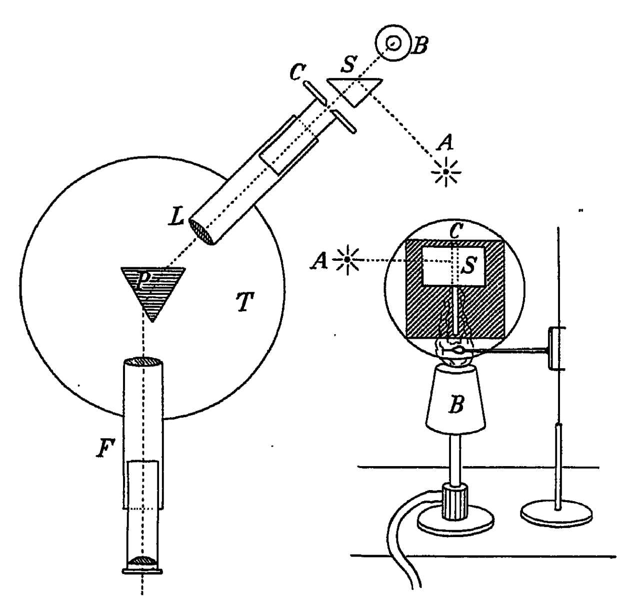


Fig. 330.

dass sie die benachbarten Farben überdecken. Dadurch erhält das Spectrum, welches durch eine solche Lösung hervorgerufen wird, eine ganz ungewöhnliche Farbenfolge, und diese Art von Lichtbrechung bezeichnet man als anomale Dispersion.

Während die chemische Beschaffenheit des brechenden Mediums nur die Stellung der Fraunhofer'schen Linien im Spectrum beeinflusst, hängt die Auswahl der Spectralfarben von der Natur der Lichtquelle, beziehungsweise von der physikalischen und chemischen Beschaffenheit des Körpers ab, welcher diese Lichtwellen aussendet.

Wenn wir als Lichtquelle einen glühenden Platindraht, den Kohlenfaden einer Glühlampe oder endlich den leuchtenden Krater eines elektrischen

Bogenlichtes verwenden, so erhalten wir ein Spectrum, das nicht von Fraunhofer'schen Linien unterbrochen ist, und daher als ein continuierliches bezeichnet wird. Ein solches Spectrum erhalten wir immer, wenn wir einen festen Körper so stark erhitzen, bis er glühend wird, oder wenn wir das von geschmolzenen Metallen ausgesendete Licht spectroskopisch untersuchen. Ein wesentlich verschiedenes Bild erhalten wir von glühenden Gasen. Der „Spectralapparat" (Fig. 330), dessen man sich bei solchen Untersuchungen bedient, besteht aus dem Spaltrohr oder „Collimator" C, durch dessen regulierbare Spalte ein schmaler Lichtstreifen dringt, die Linse L passiert und hierauf zum Prisma P gelangt, welches die Farbenzerstreuung hervorruft. Das Spectrum beobachtet man durch ein Kepler'sches Fernrohr mit Fadenkreuz, welches die Lage der aus dem Prisma kommenden Strahlen genau zu bestimmen gestattet. Durch die spiegelnde Fläche eines Glasprismas S lässt man noch die Strahlen einer anderen Lichtquelle A z. B. des Sonnenlichtes eintreten, um beide übereinander gestellte Spectra vergleichen zu können.

Gase kann man dadurch zum Leuchten bringen, dass man sie im stark verdünnten Zustande in einer Glasröhre einschließt und in derselben mittelst einer Influenzmaschine oder eines Inductoriums elektrische Funkenentladungen hervorruft. Die zu diesem Zwecke hergestellten „Geißler'schen Röhren" sind in der Mitte zu einer Haarröhre ausgezogen, die knapp vor der Spalte des Collimators aufgestellt wird. Körper, die bei der gewöhnlichen Temperatur im festen oder flüssigen Zustande vorkommen, werden in der nicht leuchtenden Flamme eines Bunsenbrenners so weit erhitzt, bis sie als glühende Dämpfe entweichen. In dem von solchen leuchtenden Gasen und Dämpfen ausgehenden Lichte kommen nicht Lichtwellen von allen möglichen Wellenlängen vor, wie bei festen und flüssigen Körpern, sondern es treten nur an bestimmten Stellen des Spectrums leuchtende Linien auf, welche auf Lichtstrahlen von bestimmter Wellenlänge zurückzuführen sind. Kirchhoff und Bunsen, ersterer Professor der Physik, letzterer Professor der Chemie an der Universität Heidelberg, entdeckten, dass die Wellenlänge, also auch die Farbe des ausgesandten Lichtes fast ausschließlich von der chemischen Natur der glühenden Gase abhänge, und Kirchhoff stellte im Jahre 1860 noch den Satz auf, dass jeder leuchtende Körper Strahlen von ganz bestimmter Wellenlänge aussende und dieselben bei der gleichen Temperatur im nämlichen Verhältnisse auch zu absorbieren vermöge. Vergleicht man ein solches Spectrum mit dem unmittelbar darüber befindlichen Sonnenspectrum, so zeigt sich, dass einzelne helle Linien mit bestimmten dunklen Linien des Sonnenspectrums zusammenfallen. Dass insbesonders die vom Natriummetall gelb gefärbte Flamme eine Doppellinie im Spectrum hervorrufe, die mit der dunklen Doppellinie D im Sonnenspectrum übereinstimmt, hatte schon Fraunhofer festgestellt; Foucault bemerkte im Jahre 1849, dass die leuchtenden Natriumdämpfe vor der Spalte des Collimators an der Stelle D des Sonnenspectrums eine dunkle Linie hervorzurufen vermöge, Kirchhoff zeigte endlich, dass die glühenden Natriumdämpfe auch aus einem continuierlichen Spectrum die Lichtstrahlen von derselben Wellenlänge auszulöschen oder zu absorbieren vermag.

Das aus einzelnen hellen Linien bestehende Spectrum gibt uns also an, welche Wellenlänge die von einem leuchtenden Gase ausgesandten Lichtstrahlen haben, und wird deshalb als ein Emissionsspectrum bezeichnet,

während man ein Spectrum, in dem dunkle Linien auftreten, weil einzelne Lichtstrahlen von bestimmter Wellenlänge durch Absorption getilgt wurden ein Absorptionsspectrum nennt.

Wenn man die Emissionsspectra verschiedener chemischer Elemente vergleicht, so scheinen sie aus ganz unregelmäßig nebeneinander gereihten Linien zu bestehen, und es ist daher sehr schwer, die zum gleichen Elemente gehörigen als ein zusammenhängendes Ganzes aufzufassen. Bei den Alkalien treten sie aber beim Normalspectrum als sogenannte Serien auf, die aus einer Reihe von Linien bestehen, welche gegen das violette Ende des Spectrums hin immer näher zusammenrücken (Fig. 331). Die in den sichtbaren Theil des Spectrums fallenden Linien sind meist nur die letzten Ausläufer solcher Serien. Bei anderen Elementen, besonders bei Kohlenstoff und Stickstoff sind diese Serien viel enger aneinander gereiht und bilden so eine „Bande" von Serien, deren Linien den Eindruck von cannelierten Säulen hervorrufen. (Spectraltafel.)

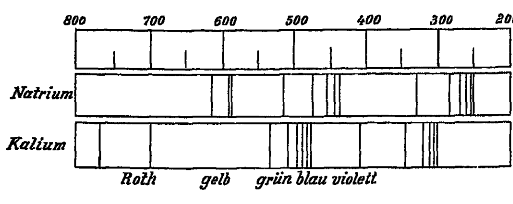


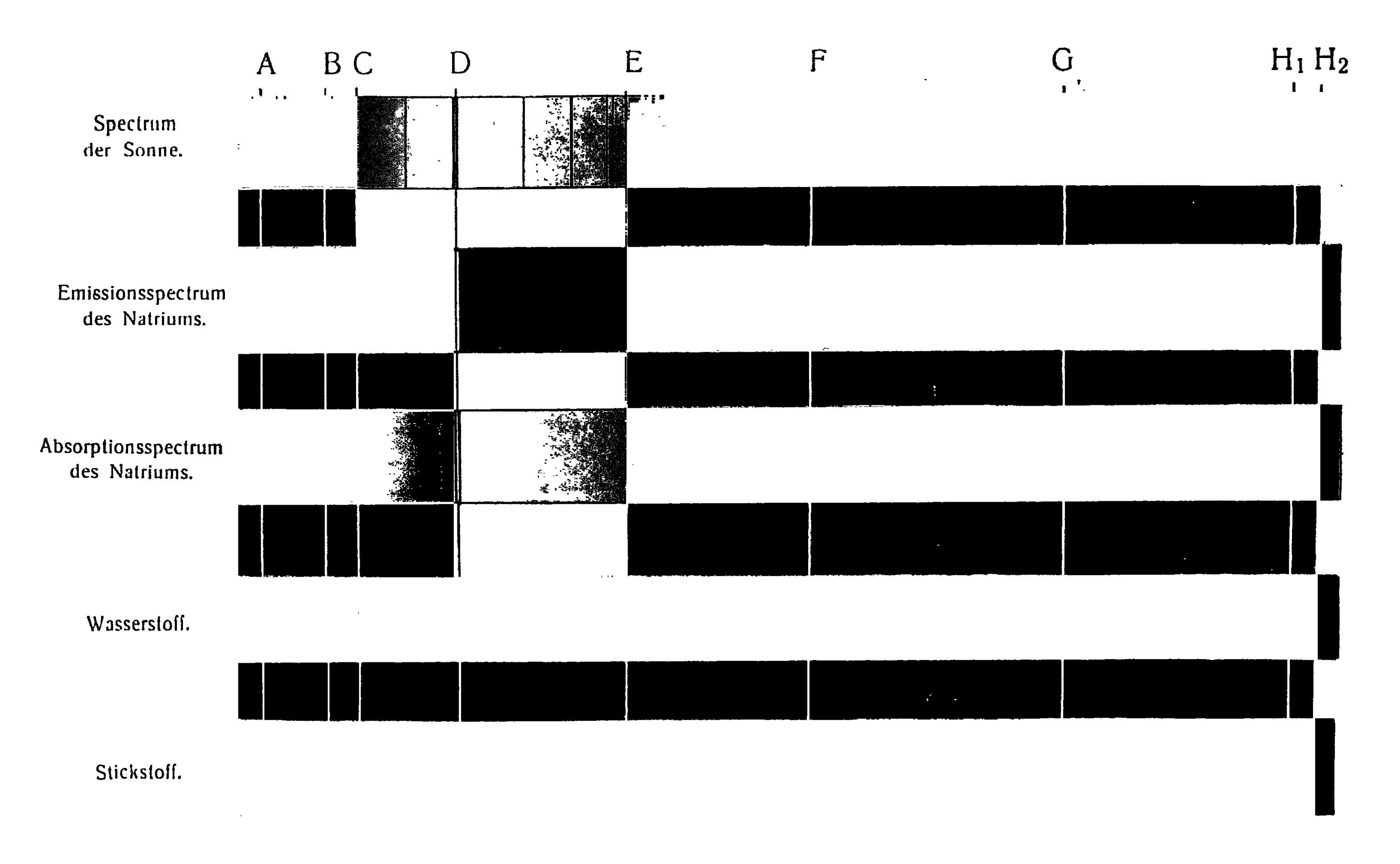
Fig. 331.

Manche Linien der Emissionsspectra treten bereits auf, wenn minimale Mengen des betreffenden Elementes zum Glühen kommen, und gestatten daher schon die geringsten Spuren desselben nachzuweisen. So lässt sich z. B. auf diesem Wege die Anwesenheit von Natrium durch das Auftreten der gelben Doppellinie D schon bei weniger als ein Milliontel Milligramm feststellen. Man kann also die chemischen Bestandtheile eines Körpers durch Beobachtung des Spectrums bestimmen, wenn dieselben durch Erhitzen in den gasförmigen Zustand übergeführt werden können. Mit den verschiedenen Methoden, auf diesem Wege einen Körper chemisch zu analysieren, befasst sich die Spectralanalyse. Sie führte nicht nur zur Entdeckung mehrerer neuer Elemente, sondern sie gestattet sogar, auf fremden Himmelskörpern die Anwesenheit einzelner Elemente nachzuweisen, die sich auch auf der Erde vorfinden, wie z. B. den Wasserstoff in den Protuberanzen auf der Sonne.

Luminescenzerscheinungen.

Fluorescenz. Wenn die Lichtwellen in verschiedene Körper eindringen, so werden sie durch dieselben mannigfach verändert. Fällt das Sonnenspectrum auf eine Scheibe aus Uranglas, so nimmt es an Länge bedeutend zu, und man bemerkt die Fraunhofer'schen Linien auch in einem Gebiete, das jenseits von den violetten Strahlen liegt und das man daher das ultraviolette Spectrum nennt. Die meisten Linien der Serien des Kaliums und Natriums fallen in dieses Gebiet. Diese Strahlen zeichnen sich besonders durch chemische Wirkungen aus. Man kann daher diesen Theil des Spectrums auch dadurch sichtbar machen, dass man das Spectrum photographiert. Wie nicht alle Luftschwingungen Gehörsempfindungen hervorrufen, so erzeugen also auch manche Ätherschwingungen keine Gesichtsempfindungen, wenn ihre Wellenlänge oder Schwingungszahl außerhalb gewisser Grenzen liegt.

Die Wellenlänge der ultravioletten Strahlen muss wegen der starken Brechbarkeit kleiner sein als die der violetten. Unter Fluorescenz versteht man die Eigenschaft mancher Körper, Ätherschwingungen von geringerer Wellenlänge und größerer Schwingungszahl in solche von größerer Wellenlänge und kleinerer Schwingungszahl zu verwandeln. Ähnliche Veränderungen der Lichtstrahlen bringen auch verschiedene Flüssigkeiten hervor, so z. B. eine Lösung von schwefelsaurem Chinin, gut gereinigtes Petroleum u. a.



Spectraltafel.

Die Bezeichnung Fluorescenz kommt daher, weil sich diese Erscheinung auch bei manchen Flussspatkrystallen zeigt.

Unter **Phosphorescenz** versteht man die Erscheinung, dass manche Körper, nachdem sie längere Zeit beleuchtet wurden, auch bei gewöhnlicher Temperatur Licht auszusenden vermögen. Sie tritt meistens in Verbindung mit Fluorescenzerscheinungen auf, indem das vom Körper zurückgestrahlte Licht andere Farbentöne aufweist als das ursprüngliche. Am stärksten bemerkt man diese Erscheinung bei den sogenannten „Leuchtsteinen“, die aus Schwefelverbindungen mit Calcium, Strontium und Barium hergestellt werden. Die violetten und ultravioletten Strahlen vermögen die Phosphorescenz stärker zu erregen als die gelben und rothen Strahlen, und ein phosphorescierender Schirm, der von einem Spectrum und zugleich vom diffusen Tageslicht beleuchtet wurde, zeigt den violetten und ultravioletten Theil auffallend heller als die Umgebung, das nach der rothen Seite verlängerte Spectrum aber dunkler als die übrige Fläche. Es gibt also nicht nur ein ultraviolettes, sondern auch ein ultrarothes Spectrum.

Alle derartigen Lichterscheinungen, die nicht durch Glühen hervorgerufen werden, bezeichnet man als Luminescenz, insbesondere als Photoluminescenz, wenn dieselbe durch Beleuchtung hervorgerufen wurde. Ähnlicher Natur ist das von Leuchtkäfern und Meeresthieren ausgestrahlte Licht.

Die Farben der Körper.

Relativ wenige, nämlich nur die durchsichtigen Körper lassen die Lichtstrahlen bis zu großer Tiefe unverändert eindringen. Sehr häufig bringt es die Constitution des Körpers mit sich, dass an zahlreichen Stellen Reflexionen auftreten und daher die meisten Strahlen diffus zurückgeworfen werden; geschieht dies bei allen Arten von Strahlen, so machen solche Körper auf uns den Eindruck von weiß durchscheinend, wie es z. B. beim Marmor der Fall ist. Zeigt dagegen ein Körper im diffusen Tageslichte eine bestimmte Spectralfarbe, so müssen wir annehmen, dass er nur Lichtstrahlen von bestimmter Wellenlänge diffus reflectiert und dass daher die übrigen Lichtstrahlen im Körper als solche vernichtet oder absorbiert wurden. Bei den undurchsichtigen Körpern tritt diese Absorption schon in den obersten Schichten ein; wenn dabei alle Lichtarten vernichtet und in Wärme umgesetzt werden, so erscheinen sie uns schwarz. Die Krystalle des „Dichroit“ haben die Eigenschaft, nach verschiedenen Richtungen andere Lichtstrahlen zu reflectieren, und erscheinen deshalb, von verschiedenen Seiten betrachtet, anders gefärbt. Alle im durchscheinenden Lichte fehlenden Farben eines Körpers werden reflectiert oder absorbiert. Die äußere Farbe eines Körpers ist demnach als die Mischung aller im Innern desselben nicht absorbierten Farbentöne aufzufassen.

Die Polarisation des Lichtes.

Alle Erscheinungen, welche bisher zur Erforschung der Natur des Lichtes herangezogen wurden, lassen sich ebensogut durch die Annahme longitudinaler wie transversaler Wellen erklären, und man neigte bis um das Jahr 1821 eher der ersteren Annahme zu. Aber bereits im Jahre 1669 hatte Erasmus Bartholinus in Kopenhagen bemerkt, dass der auf einen isländischen Doppelspath fallende Lichtstrahl sich in zwei Strahlen spaltet, von denen nur einer dem Brechungsgesetze von Snellius folgt. Ferner bemerkte Etienne-Louis Malus, als er mit der Lösung einer von der Pariser Akademie ausgeschriebenen Preisaufgabe über die Doppelbrechung beschäftigt war, dass die von einem benachbarten Fenster reflectierten Lichtstrahlen in einem Doppelspat nicht immer mit derselben Intensität sichtbar waren, wenn er

denselben um eine bestimmte Achse drehte. Eine ähnliche Erscheinung kann man bei folgendem Versuche beobachten. Legt man zwei Kalkspat-Rhomboëder so übereinander, wie es Fig. 332 a zeigt, so sieht man einen auf der Unterlage gezeichneten Punkt zweimal, wie in Fig. 332 b. Wenn man das Rhomboëder I allein um eine verticale Achse dreht, so treten zuerst vier Punkte auf (Fig. 332 c), und es verschwinden einmal die beiden Bilder 12′ und 21′ und nach einer weiteren Drehung um 90° die Bilder 11′ und 22′. Die Intensität dieser Lichtstrahlen ist also von der Orientierung des Krystalles abhängig, und daher bezeichnet man den Strahl als nach dieser bestimmten

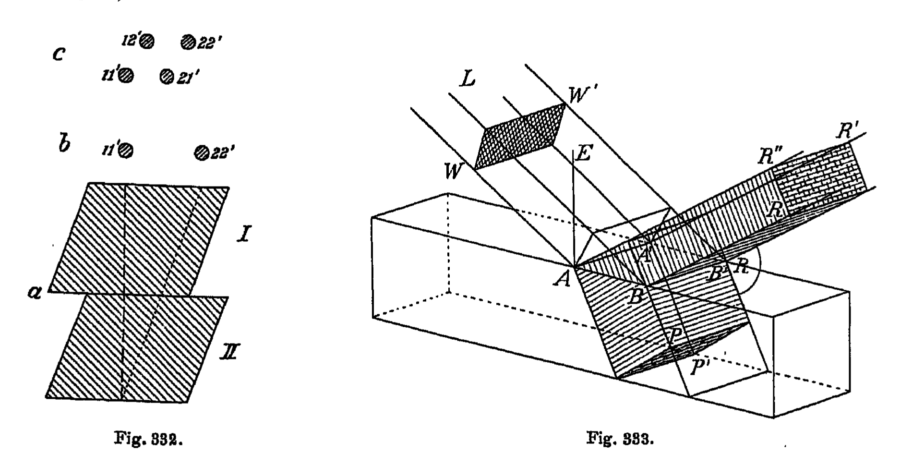


Fig. 332. Fig. 333.

Richtung polarisiert. Wie es undenkbar ist, dass ein Pfeifenton deshalb aufhören soll, wenn man die Pfeife um ihre Längsachse dreht, so schien es auch räthselhaft, warum ein Lichtstrahl verschwinden soll, wenn das Medium, durch welches er sich fortpflanzt, um die Fortpflanzungsrichtung gedreht wird. Während der um die Wellentheorie des Lichtes hochverdiente Th. Young und der Entdecker und Erforscher der Polarisationserscheinung Malus diesem Probleme rathlos gegenüberstanden, entschied sich Fresnel rasch für die Annahme von Transversalwellen, und so gelang es ihm, die Polarisation ungezwungen zu erklären. Im Jahre 1815 entdeckte hierauf der englische Physiker Brewster, dass der von einer Glasplatte reflectierte Strahl ebenfalls polarisiert sei, wenn der gebrochene Strahl auf ihm senkrecht steht. Dies ist aber der Fall, wenn Einfallswinkel und Brechungswinkel complementär sind, und dann ist $n = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{\sin\alpha}{\cos\alpha} = \operatorname{tg}\alpha$; für Glas trifft dies bei 56° zu, wenn $n = 1{\cdot}5$ gesetzt wird.

$ABB'A'$ (Fig. 333) stelle die Fläche dar, in der ein Wellenstrahl mit der Wellenfläche WW' die Oberfläche eines neuen Mediums trifft, worauf er in zwei Strahlen zerfalle, die aufeinander senkrecht stehen. Die Schwingungen erfolgen in beiden Strahlen senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung, also in den Ebenen RR' und PP', in der Fläche WW' aber nach allen möglichen Richtungen innerhalb dieser Ebene, in den beiden letzten sind aber jene Richtungen bevorzugt, die zu den Seiten des rechteckigen Querschnittes parallel laufen. Fresnel nahm an, dass der reflectierte Strahl nur Transversalschwingungen in der Richtung $R'R''$ enthalte. Franz Neumann bezeichnet dagegen die darauf senkrechte Richtung RR'' als die Schwingungs-

richtung. Sie hatten beide nicht unrecht. Es gibt nämlich transversale Ätherschwingungen von verschiedener Art; die der einen Art schwingen so, wie es Fresnel, die der anderen, wie es Neumann vermuthete. Die Ebene, welche man durch den einfallenden Strahl WA und durch das Einfallsloth AE legen kann, bezeichnet man als die Polarisationsebene; Fresnel nahm demnach an, dass die Schwingungen im reflectierten Strahle auf der Polarisationsebene senkrecht stehen.

Wird ein von L kommender Lichtstrahl (Fig. 334 a) von der Glasplatte A reflectiert und zugleich polarisiert, so geben die Linien in R die Richtung der einen Art von Schwingungen an. Treffen diese Wellen auf die zu A parallele Platte B, so werden sie auch hier in der gleichen Weise reflectiert und fallen dann auf die Fläche F; R' stellt hier wieder eine Wellenfläche mit der Richtung dieser Art von Schwingungen dar, die zu den früheren parallel sind. Stellen wir aber den Spiegel B (Fig. 334 b) so auf, dass für denselben die Polarisationsebene, die früher horizontal war, in eine verticale Lage kommt, so ist diese Schwingungsrichtung nicht mehr parallel zur Glasfläche und es tritt keine Reflexion mehr ein; daher erscheint in diesem Falle die Fläche F dunkel. Drehen wir die Platte B noch einmal um einen rechten Winkel, dass der früher nach rechts reflectierte Strahl nach links geworfen wird, so wird der polarisierte Strahl R' wieder mit der ganzen Stärke reflectiert.

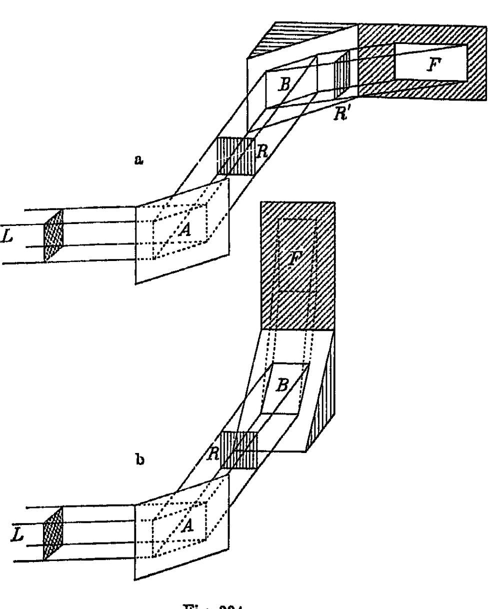


Fig. 334.

In ähnlicher Weise unterscheiden sich auch die beiden Strahlen, die im isländischen Doppelspat auftreten, und zwar stehen die Richtungen der Schwingungen aufeinander senkrecht. Der Kalkspat krystallisiert hexagonal, und in der Richtung der Hauptachse pflanzt sich die eine Art von Schwingungen mit einer anderen Geschwindigkeit fort, als in der Richtung der drei auf ihr senkrecht stehenden Nebenachsen. Die andere Art von Schwingungen pflanzt sich nach allen Richtungen mit derselben Geschwindigkeit fort. Beim isländischen Doppelspat pflanzen sich die ersteren in der Richtung der Nebenachsen mit größerer Geschwindigkeit fort. Für diese nehmen die von einem Punkte O ausgehenden Wellenflächen (Fig. 335) die Gestalt eines flach-

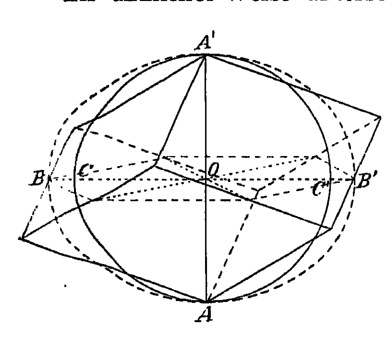
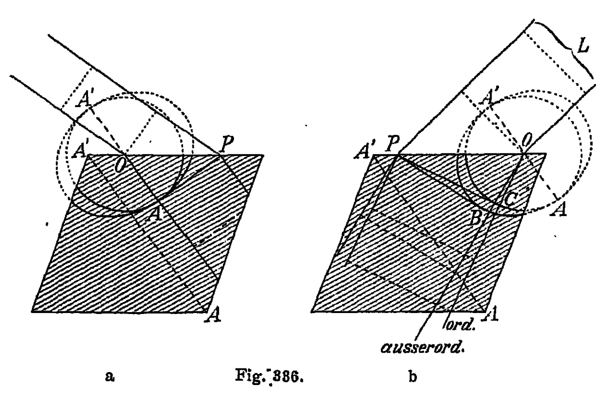


Fig. 335.

gedrückten Rotationsellipsoides an, das wir erhalten, wenn sich die Ellipse $ABA'B'$ um die Hauptachse AA' dreht. Die andere Wellenart breitet sich dagegen in Kugelwellen $ACA'C'$ aus. Construieren wir für beide Wellenflächen den gebrochenen Strahl, so erhalten wir für einen Lichtstrahl LO (Fig. 336 b) bei der Lage der Hauptachse AA' zwei Wellenflächen, PC



a Fig. 336. b

für den „ordentlichen", und PB für den „außerordentlichen oder extraordinären" Strahl. Die Polarisationsebene ist für beide dieselbe, nämlich die Zeichenebene. Im ordentlichen Strahle, welcher dem Brechungsgesetze von Snellius folgt, weil er durch Kugelwellen entstanden ist, stehen die Schwingungen der zweiten Art auf der Polarisationsebene senkrecht, im außerordentlichen die Schwingungen der ersteren Art. Hat die Hauptachse AA' des Krystalles (Fig. 336 a) eine solche Richtung, dass man an beide Wellenflächen von P aus eine gemeinsame Tangente PA ziehen kann, so entsteht nur ein gebrochener Strahl, in dem die beiden Schwingungsarten wie immer auf einander senkrecht stehen.

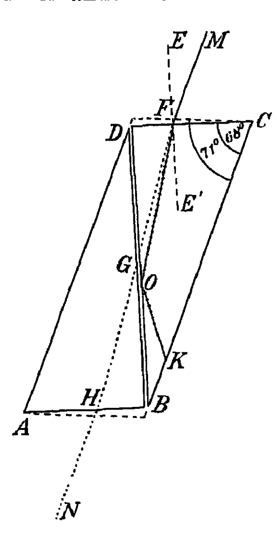


Fig. 337.

Diese Eigenschaft des Doppelspates benützt man, um sehr vollkommen polarisiertes Licht zu erzeugen. Das zu diesem Zwecke hergestellte Nicol'sche Prisma (Fig. 337) besteht aus einem Kalkspatkrystalle, bei welchem die Winkel bei A und C, die sonst 71⁰ betragen, bis auf 68⁰ zugeschliffen sind. Außerdem wird der Krystall in der Richtung der Ebene BD auseinander geschnitten und mit Kanadabalsam wieder zusammengekittet. Der in der Richtung MF einfallende Strahl wird zum Einfallslothe EE' gebrochen, und zwar der ordentliche Strahl FO stärker als der außerordentliche FG. Der Schnitt BD ist so geführt, dass beim ordentlichen Strahle bereits die totale Reflexion eintritt, während der außerordentliche nach einer kleinen Parallelverschiebung noch die Strecke GH zurücklegt und schließlich das Prisma in der Richtung HN parallel zu MF verlässt. Das Prisma befindet sich in einer mattschwarzen Umhüllung, die den bei O reflectierten ordentlichen Strahl OK bei K absorbiert. Der aus dem Nicol austretende Strahl ist also polarisiert, und

seine Polarisationsrichtung kann zugleich mit dem Prisma um eine zu MF oder HN parallele Achse gedreht werden.

Noch einfacher lässt sich gut polarisiertes Licht herstellen, indem man den Lichtstrahl durch eine Turmalinplatte leitet, die parallel zur Hauptachse des Krystalles geschliffen ist.

Alle Transversalwellen, deren Schwingungen nicht in diese Richtung fallen, kommen nur insoferne zur Geltung, als wenigstens eine Componente diese Richtung hat, im übrigen werden sie absorbiert. Wenn also ein Lichtstrahl durch eine Turmalinplatte hindurchgeht, so wird er polarisiert und vermag eine zweite derartige Turmalinplatte nur dann zu durchdringen, wenn die Achsenrichtungen parallel sind. Sind dagegen die Achsenrichtungen gekreuzt, so absorbiert die zweite Platte gerade diejenigen Schwingungen, welche die erste noch hindurchgelassen hat, und daher wirken zwei solche Platten wie eine undurchsichtige Platte, und das Gesichtsfeld erscheint dunkel. Die Turmalinzange besteht aus zwei parallelen, gegeneinander verschiebbaren Turmalinplatten und dient dazu, die Veränderungen zu beobachten, welche das polarisierte Licht durch einen Körper erleidet, der zwischen beide Platten gebracht wird.

Die chromatische Polarisation. Die zur Untersuchung des polarisierten Lichtes verwendeten Polarisationsapparate bestehen im Wesentlichen aus einem Polarisator, der das gewöhnliche Licht in polarisiertes Licht verwandelt, und dem Analysator, der dazu dient, die Richtung des polarisierten Lichtes zu erkennen. Die beiden Platten einer Turmalinzange bilden also schon einen Polarisationsapparat, denn die eine Platte erzeugt polarisiertes Licht, und aus der Helligkeit des Feldes bei den verschiedenen Stellungen der anderen Platte kann man erkennen, ob die Polarisationsrichtung zu ihrer Achse parallel ist oder nicht. Stellen wir demnach den Polarisator und den Analysator so, dass das Gesichtsfeld dunkel ist, wenn sich zwischen beiden kein anderer Körper befindet, so können wir sofort wahrnehmen, dass ein eingeschalteter Körper die Polarisationsrichtung geändert hat, wenn im dunklen Gesichtsfelde des Analysators der Körper hell hervortritt.

Von den verschiedenen Krystallen haben diejenigen des regulären, gleichachsigen oder tesseralen Systemes die Eigenschaft, dass sie auf die Richtung der Polarisationsebene keinen Einfluss nehmen, da sie im Polarisationsapparat weder das dunkle Feld hell, noch das helle dunkel erscheinen lassen. Beim tetragonalen und hexagonalen Systeme verhalten sich die Krystalle in der Richtung der Hauptachse anders, als in allen darauf senkrechten Richtungen. Im rhombischen, monoklinischen und triklinischen Systeme ändern sich die Fortpflanzungsbedingungen nach allen Seiten. Bei tetragonalen und hexagonalen Krystallen gibt es aber eine Richtung, bei der die beiden Wellenflächen, wie aus Fig. 336 a ersichtlich war, eine gemeinsame Tangente haben, und daher erhalten wir in diesem Falle auch nur einen einzigen gebrochenen Strahl, dessen Richtung mit der Achse zusammenfällt. Solche Krystalle bezeichnet man als optisch einachsig. Bei den Krystallen des rhombischen, monoklinischen und triklinischen Systemes gibt es zwei nicht mit den Krystallachsen übereinstimmende Richtungen, bei welchen trotz der Doppelwelle die gebrochenen Strahlen zusammenfallen, und daher heißen solche Krystalle optisch zweiachsig.

Dünne Blättchen von Gips und Glimmer, die beide monoklinisch krystallisieren, haben die Eigenschaft, dass sie in zwei aufeinander senkrechten Stellungen auf die Polarisationsebene keinen Einfluss nehmen und daher weder das dunkle Gesichtsfeld hell, noch das helle dunkel machen. In allen anderen Lagen zerlegen sie den polarisierten Strahl in zwei aufeinander senkrechte Componenten, und deshalb zeigt der polarisierte Strahl, der ein solches Blättchen passiert hat, eine andere Polarisationserscheinung. Fig. 338 a und b stellt ein solches Blättchen $MM'NN'$ in den beiden Stellungen dar, in welchen es auf die Polarisationsrichtung AB keinen Einfluss nimmt. In Fig. 338 c schließen die Richtungen beider Schwingungsarten mit der Polarisationsrichtung AB einen Winkel von 45^0 ein. Wenn wir das Gesichtsfeld außerhalb und innerhalb des Gipsblättchens durch einen Analysator betrachten, der das äußere Feld dunkel erscheinen lässt, so wird das Blättchen hell erscheinen, weil beide Schwingungsarten je eine Componente für die Polarisationsrichtung AB des Analysators liefern.

Verwenden wir zunächst zur Polarisation homogenes Licht, und zwar das der D-Linie entsprechende Licht mit der Wellenlänge von 385 μμ im Gipsblättchen, so pflanzen sich diese Wellen bei der Schwingungsrichtung OR (Fig. 338 c) mit einer anderen Geschwindigkeit fort als bei der Schwingungsrichtung OQ; hat das verwendete Gipsblättchen eine Dicke von 0·079 mm, so entfallen auf diese Strecke 192·5 Wellenlängen in der Richtung OQ und 193·5 in der Richtung OR; sie werden also beide das Blättchen mit derselben Phase verlassen, mit der diese Componenten der Schwingung OP in das Blättchen eingetreten sind. Beim Austritte setzen sie sich wieder zu einer Schwingung in der Richtung OP zusammen, die den Analysator nicht passiert, wenn derselbe nur Schwingungen mit der Richtung OQ' hindurchlässt. Bei der halben Dicke der Platte unterscheiden sich die Schwingungsarten in beiden Richtungen nur um eine halbe Welle, und dann setzen sich beim Austritte die Schwingungen OQ und OR'' zu einer Schwingung in der Richtung OQ' zusammen, die der Analysator bei gekreuzter Stellung durchlässt. Bei weißem Licht wird also eine solche Platte bewirken, dass im Analysator

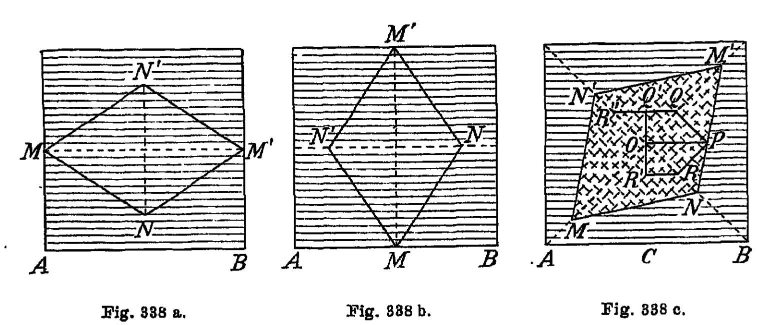


Fig. 338 a. Fig. 338 b. Fig. 338 c.

nur das gelbe Lichte vollständig und die benachbarten Farben nahezu gelöscht werden während sich die übrigen Farben zu einer Mischfarbe vereinigen, die einen blauen Grundton hat. Drehen wir den Analysator um einen rechten Winkel, so wird gerade die gelbe Farbe mit voller Kraft hervortreten und sich mit den benachbarten Farben zu einer Mischfarbe vereinigen, während die blauen Farbentöne zurücktreten. Bei anderen Stellungen des Analysators werden andere Mischfarben der Reihe nach auftreten; dieser Farbenwechsel wird auch bei einer anderen Plattendicke aber in anderen Stellungen eintreten. Während also bei der Drehung des Analysators das äußere Gesichtsfeld abwechselnd hell und dunkel wird, so oft die Drehung einen rechten Winkel ausmacht, gehen die Farben eines Gips- oder Glimmerblättchens in die complementären Farbentöne über. Dieser Farbenwechsel ist das charakteristische Zeichen dafür, dass sich zwischen dem Analysator und dem Polarisator ein doppeltbrechender Körper befindet, denn nur ein solcher vermag für jede Wellenlänge die beiden Schwingungsarten eines polarisierten Lichtstrahles voneinander zu trennen, weil er für beide eine andere Wellenfläche besitzt, und die eine von beiden breitet sich wieder nach verschiedenen Richtungen mit anderen Geschwindigkeiten aus.

Gewöhnliches Glas, das sich nach dem Gusse langsam abgekühlt hat und zu einer nach allen Richtungen homogenen Masse erstarrt ist, zeigt im Polarisationsapparate keine Veränderung des Gesichtsfeldes, wenn dasselbe auf dunkel eingestellt ist. Wenn man aber auf das Glas in irgend einer Richtung einen Druck ausübt, so ändert sich gleich in der ganzen Umgebung die Fortpflanzungsgeschwindigkeit für die eine Art von Aetherschwingungen, und dann tritt auch das Erkennungszeichen der eingetretenen Doppelbrechung auf, indem das früher dunkle Gesichtsfeld an einzelnen Stellen hell und färbig wird. Rasch abgekühlte Gläser sind doppelt brechend, weil die äußeren schneller festgewordenen Glasschichten auf die inneren einen Druck ausüben.

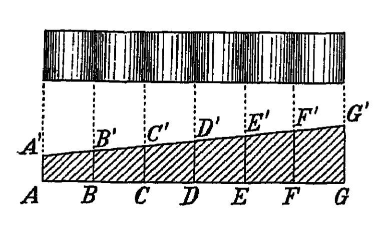


Fig. 339 a.

Schieben wir zwischen Polarisator und Analysator eine Gipsplatte, deren Dicke nach einer Seite stetig zunimmt (Fig. 339 a), so sehen wir in dem auf dunkel eingestellten Felde den eingeschobenen Keil bei homogenem, z. B. bei gelbem Lichte überall dort von einem dunklen Streifen durchzogen,

wo sich bei einer gewissen Dicke die gelben Strahlen tilgen. Verwenden wir statt des homogenen Lichtes weißes Licht, so werden an den verschiedenen Stellen nur einzelne Farbengruppen verschwinden, und es wird sich eine regelmäßig wiederkehrende Folge von Farbenmischungen einstellen.

Wenn das polarisierte Licht eine Kalkspatplatte in convergenten Strahlen durchsetzt, wie es bei mikroskopischen Beobachtungen der Fall ist, so legen die durch die Platte gehenden Strahlen in derselben einen desto längeren Weg zurück, je größer der Einfallswinkel ist, und daher werden sich von der Mitte weg die nämlichen Farbenperioden in Gestalt von färbigen Ringen einstellen, wie wir sie früher beim Keile erhalten haben (Fig. 339 b). In zwei aufeinander senkrecht stehenden Richtungen nimmt

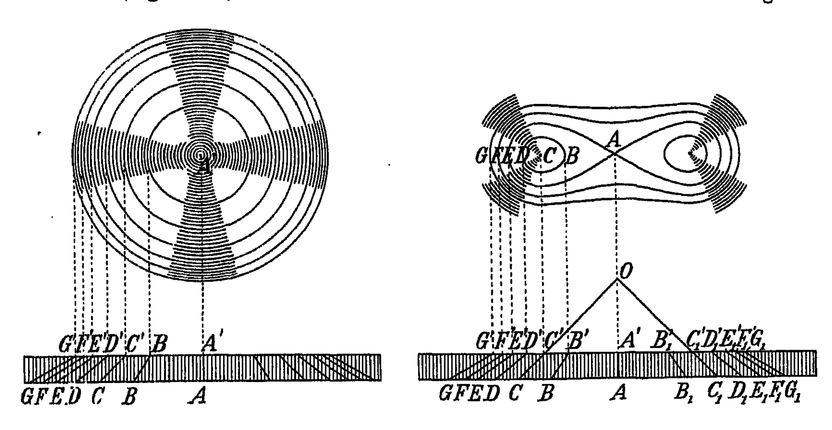


Fig. 339 b. Fig. 339 c.

aber die Platte auf die Polarisationsrichtungen keinen Einfluss, und daher werden die färbigen Ringe von einem dunklen Kreuze durchzogen sein, wenn das äußere Feld auf dunkel eingestellt war, im gegentheiligen Falle aber von einem hellen Kreuze durchbrochen werden. Wir erhalten also im ersteren Falle das Bild Fig. 339 b mit dunklen Kreisen bei homogenem Lichte, und statt der dunklen, färbige Ringe bei weißem Lichte. Wenn der Durchschnittspunkt A des Kreuzes in der Mitte des Gesichtsfeldes liegt, so folgt daraus, dass die optische Achse AA' des Krystalles auf der Ebene der Platte senkrecht steht; anderenfalls erscheint der Mittelpunkt dieser Figur außerhalb des Mittelpunktes des Gesichtsfeldes.

Bei optisch zweiachsigen Krystallen, also bei Gips und Glimmer (Fig. 339 c) gibt es zwei aufeinander senkrechte Richtungen OC und OC_1, in welchen die Doppelbrechung nicht zur Geltung kommt. Um diese schließen sich mehrere färbige Ringe, bis die Phasenverschiebung so groß ist, wie im Halbierungspunkte A. Hier bildet sich eine Curve von der Gestalt der Ziffer 8, die man als Lemniskate bezeichnet. Weitere Gebiete gleicher Phasendifferenz umschließen beide Achsengebiete zugleich; auch diese Figur wird von zwei dunklen Streifen durchzogen, welche die Gebiete angeben, in denen diese Krystallplatten auf die Polarisationsrichtung keinen Einfluss nehmen. Ein Krystall, der im convergenten polarisierten Lichte diese Polarisationserscheinung mit den beiden Ringsystemen zeigt, kann daher nur dem rhombischen, monoklinischen oder triklinischen Krystallisationssysteme angehören, da die beiden getrennten Farbenringe auf zwei sich schneidende optische Achsen zurückzuführen sind.

Eine andere charakteristische Erscheinung der chromatischen Polarisation ist die D r e h u n g d e r P o l a r i s a t i o n s e b e n e, wie sie durch manche Krystalle und Flüssigkeiten hervorgebracht wird. In dieser Hinsicht zeichnet sich besonders der Bergkrystall aus, welcher je nach seinem krystallinischen Aufbau die Polarisationsebene nach entgegengesetzten Richtungen dreht. Bei manchen gut ausgebildeten Bergkrystallen kommt es vor (Fig. 340 a und b), dass einige Ecken und Kanten, in welchen die dreiseitige Pyramide von den Seitenflächen des sechsseitigen Prismas geschnitten wird, durch kleinere Flächen abgestumpft sind. Die Lage dieser kleinen Flächen bestimmt die Richtung, nach der die Polarisationsebene gedreht wird, wenn ein polarisierter Strahl den Krystall in der Richtung der optischen Achse durchsetzt. Wenn wir zum Versuche gelbes Natriumlicht verwenden und zwischen Polarisator und Analysator eine Quarz-

platte von der Dicke 0·833 mm einschalten, so wird das dunkle Feld hell und wir müssen den Analysator um 15° drehen, um wieder ein dunkles Feld zu erhalten. Die Schwingungsrichtung des polarisierten Lichtes *MM'* muss sich also um 15° gedreht haben, wie es Fig. 341 andeutet. Eine Platte von 1 mm Dicke dreht die Polarisationsebene um 24°, und eine Platte von der Dicke 3·75 mm bewirkt schon eine Drehung um 90°. Im letzteren Falle wird im Polarisationsapparate die Fläche des Quarzkrystalles hell erscheinen, wenn das übrige Gesichtsfeld dunkel ist und umgekehrt. Wiederholen wir den Versuch mit weißem Lichte, so wird das dunkle Gesichtsfeld durch das Einschalten der Quarzplatte von 3·75 mm hell, aber es wird die gelbe Farbe durch die Drehung um 90° gelöscht bleiben, und die übrigen geben miteinander wieder eine blau-

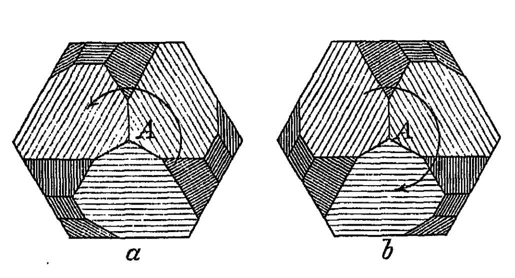


Fig. 340.

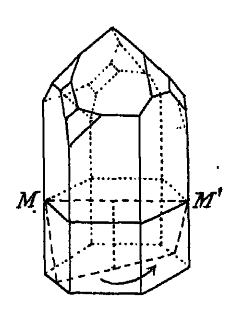


Fig. 341.

violette Mischfarbe. Da das Auge gerade für die gelbe Farbe sehr empfindlich ist, so bemerken wir sehr leicht jede Änderung des Farbentones, der dadurch zustande kommt, dass statt der gelben Farbe orange oder grün aus der Mischung ausgeschieden wird. Drehen wir also den Analysator etwas nach der einen Seite, so wird der blau-violette Farbenton in einen blauen übergehen, drehen wir dagegen nach der anderen Seite, so erhalten wir sofort einen ausgesprochen rothen Farbenton. War das beim rechtsdrehenden Quarz der Fall, so müssen wir bei einem linksdrehenden Quarz jedesmal nach der entgegengesetzten Seite drehen, um den Übergangston mit einem blauen zu vertauschen oder ihn in die rothe Farbe überzuführen. Wenn wir daher eine Soleil'sche Doppelplatte (Fig. 342) einschalten, von der die eine Hälfte aus einem linksdrehenden, die andere aus einem rechtsdrehenden Quarze besteht, so wird die eine Hälfte bei der geringsten Drehung des Analysators sofort ein blaues, die andere ein rothes Feld geben, und die Grenzlinie wird nur bei einer ganz bestimmten Stellung des Analysators verschwinden. Die Übergangsfarbe bezeichnet man als die „empfindliche Farbe" oder als „teinte de passage".

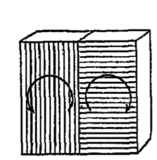


Fig. 342.

Eine ähnliche Drehung der Polarisationsebene bringen auch manche Flüssigkeiten hervor, die man dann als optisch active bezeichnet. Alkoholische Kampferlösungen, sowie wässerige Lösungen von Rohr- und Traubenzucker drehen die Polarisationsebene nach rechts, dagegen arabischer Gummi, Chinin, Morphium u. a. nach links. Aus der Stärke der Drehung lässt sich besonders der Zuckergehalt einer Lösung mit ziemlicher Genauigkeit feststellen. Der dazu dienende Apparat, das Saccharimeter, besteht im Wesentlichen aus einem Polarisator, von dem aus das polarisierte Licht seinen Weg durch eine längere, mit der zu untersuchenden Zuckerlösung gefüllten Röhre nimmt; man könnte die Drehung unmittelbar aus der Verstellung der Polarisationsebenen des Polarisators und des Analysators entnehmen. Der Apparat wird aber viel empfindlicher, wenn man auch noch Soleils Doppelplatte einschaltet, ohne Einführung der Zuckerlösung den Analysator auf den Übergangston einstellt und hierauf denselben soweit dreht, bis die durch Einschaltung der Zuckerlösung eingetretene Farbendifferenz wieder verschwindet. Da bei einer Röhrenlänge von 20 cm auf je 16·35 Gramm Zucker in 100 cm³ eine Drehung der Polarisationsebene um 24° entfällt, so lässt sich auf diesem Wege der Zuckergehalt ohne Anwendung einer chemischen Analyse ermitteln.

Eine andere für die Erkenntnis der Natur des Lichtes wichtige Erscheinung ist die folgende, die Faraday im Jahre 1845 entdeckt hat. Schaltet man nämlich eine mit Schwefelkohlenstoff gefüllte Röhre zwischen die Pole eines sehr starken Magneten, dass die Kraftlinien parallel zur Achse der Röhre verlaufen, so erfährt ein polarisierter

Lichtstrahl, der sich in dieser Richtung fortpflanzt, eine Drehung der Schwingungsebene im Sinne der Ampère'schen Ströme, d. h. in jenem Sinne, in welchem die Röhre von elektrischen Strömen umflossen werden müsste, um magnetische Kraftlinien von derselben Richtung in ihr hervorzurufen. Daraus ergibt sich, dass die magnetischen und elektrischen Ströme auch jene Ätherschwingungen beeinflussen, die unser Auge als „Licht" empfindet.

Wärmestrahlen.

Ein Körper kann nicht nur durch Leitung, sondern auch durch Strahlung erwärmt werden. Dies lässt sich sowohl durch empfindliche Thermometer, besonders aber durch die thermoelektrische Säule mit Hilfe eines Galvanometers nachweisen, da dieselbe sehr geringe Temperaturunterschiede anzugeben vermag und sie viel schneller bemerkbar macht als die gebräuchlichen Thermometer. Wir verbinden die Pole einer solchen Thermosäule T (Fig. 343)

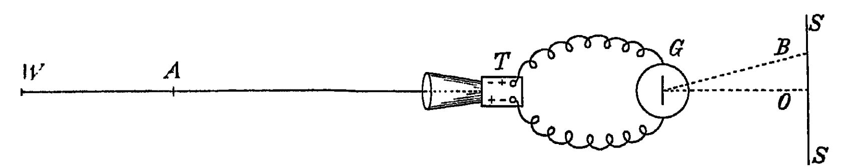


Fig. 343.

mit einem Galvanometer G, dessen Ausschläge durch die Bewegung eines reflectierten Lichtbildes B auf einer Scala SS gemessen werden können; wir überzeugen uns, dass ein Kerzenlicht schon aus größerer Entfernung einen Ausschlag des Lichtbildes nach der einen Seite hervorbringt, während wir einen Ausschlag nach der anderen Seite bekommen, wenn wir an die Stelle der Kerze einen Eisblock geben. Da sich zwischen der Wärmequelle und der Thermosäule nur Luft, also ein sehr schlechter Wärmeleiter befindet, so kann eine so schnelle Wirkung nicht auf einer Übertragung durch Leitung beruhen. Dass von einer Wärmequelle Wellenstrahlen mit transversalen Schwingungen ausgehen, ergibt sich aus folgenden Versuchen. Wir können zunächst zeigen, dass manche Körper im durchstrahlten Raume eine Art Schattenwirkung hervorrufen. Befindet sich das Lichtbild in B, wenn bei W die Wärmequelle aufgestellt wird, so geht das Bild sofort gegen O zurück, wenn wir bei A einen mit Ruß bedeckten Schirm einschalten. Beim Wegziehen des Schirmes kommt der Ausschlag sofort wieder zum Vorschein. Der englische Physiker Leslie hat im Jahre 1804 nachgewiesen, dass ein mit siedend heißem Wasser gefülltes, würfelförmiges Gefäß aus Blech durch eine berußte Seitenwand mehr Wärme ausstrahlt als durch eine metallisch blanke Fläche. Aber nicht nur die für Licht undurchsichtige Rußschichte, sondern auch der durchsichtige Alaun vermag eine ähnliche Schattenwirkung hervorzubringen; solche, die Wärmestrahlen unterbrechende Körper bezeichnet man als adiatherman. Eine dicke Wasser- oder Glasschichte hält die Wärmestrahlen viel weniger zurück. Eine Steinsalzplatte lässt die Wärmestrahlen auch bei starker Strahlung fast ungehindert durch und wird daher diatherman genannt; ebenso durchlässig wie die durchsichtige Steinsalzplatte ist auch eine undurchsichtige Lösung von Jod in Schwefelkohlenstoff. Die atmosphärische Luft ist im hohen Grade diatherman, was für die thermischen Erscheinungen in der Atmosphäre von großer Wichtigkeit ist. Dass die Wärmestrahlen wie die Lichtstrahlen reflectiert werden können, lässt sich dadurch zeigen,

dass man hinter der Wärmequelle einen metallenen Hohlspiegel aufstellt, der nach dem Reflexionsgesetze die Strahlen auf die Thermosäule concentriert; die Strahlungswirkung wird dadurch wesentlich gesteigert. Auch die Abkühlung bei einem Eisblocke lässt sich auf diesem Wege viel deutlicher zeigen, weil dabei die Wärmestrahlen in größerer Menge von der Thermosäule nach dem Eisstücke ausgestrahlt werden.

Die Brechbarkeit der Wärmestrahlen ergibt sich aus folgendem Versuche. Wenn man bei *W* (Fig. 343) eine glühende Metallkugel befestigt, so werden sich die von ihr ausgehenden Wärmestrahlen durch einen Ausschlag des Galvanometers bemerkbar machen. Da das Steinsalz diatherman ist, so vermag eine planparallele Steinsalzplatte die Wirkung wohl etwas zu schwächen, aber keineswegs zu erhöhen. Man erzielt aber eine Steigerung des Ausschlages, wenn man bei *A* eine aus Steinsalz hergestellte biconvexe Linse einschaltet, welche nur durch Brechung eine größere Anzahl von Wärmestrahlen auf die Thermosäule vereinigen kann.

Wenn man die einzelnen Theile des Spectrums auf ihre Wärmewirkung untersucht, so zeigt sich, dass die Wärmewirkungen in demselben umso stärker auftreten, je mehr man sich dem rothen Ende des Spectrums nähert. Es lässt sich auch zeigen, dass das Gebiet der vom Prisma ausgehenden Strahlen beim rothen Ende über den sichtbaren Theil des Spectrums hinausreicht. Mit Hilfe schmaler Thermosäulen ließen sich auf diesem Gebiete selbst die Fraunhofer'schen Linien nachweisen. Die Existenz des ultrarothen Spectrums hat der berühmte Astronom Herschel schon im Jahre 1800 mit Hilfe einfacher Thermometer nachgewiesen, deren Kugel er mit Ruß überzog, weil dieser alle Wärmestrahlen absorbiert. Die strahlende Wärme wurde mit Hilfe der Thermosäule von Nobili zuerst durch Melloni in Parma (1834) untersucht.

Das ganze Spectrum umfasst ein Gebiet von Wellenlängen, die zwischen 0·016 mm im ultrarothen und 0·0002 mm im ultravioletten Theile liegen; sichtbar ist aber nur das Gebiet von 0·00076 mm mit 395 Billionen Schwingungen in der Secunde bis zu 0·000395 mm mit 758 Billionen Schwingungen; der sichtbare Theil des Spectrums erstreckt sich also nur über ein Gebiet, das man in der Akustik als eine Octav bezeichnen würde, während das Spectrum vom äußersten ultrarothen bis zum ultravioletten Ende etwa sechs Octaven brechbarer transversaler Ätherwellen umfasst.

Damit ist das Gebiet der transversalen Ätherwellen, welche Reflexion, Brechung und Beugung zulassen, noch immer nicht abgeschlossen. Das Problem, wie sich Transversalwellen mit den verschiedensten Wellenlängen und Schwingungszahlen in einem weitausgedehnten, von Äther erfüllten Raume ausbreiten, hat besonders durch den englischen Physiker James Clerk Maxwell in seinem Werke über Magnetismus und Elektricität (1865) eine umfassende mathematische Behandlung erfahren, aus der sich ergibt, dass man das Licht als eine Form elektrischer und magnetischer Schwingungen auffassen könne, die sich insgesammt mit der Geschwindigkeit des Lichtes durch den luftleeren Raum fortpflanzen und durch die Eigenschaften der verschiedenen Körper in mannigfacher Weise verändert werden. Durch Heinrich Hertz haben dessen Entwicklungen ihre experimentelle Bestätigung gefunden, indem es demselben gelungen ist, die „Ausbreitung der elektrischen Kraft", wie er sich ausdrückt, durch sehr kleine Funkenentladungen nachzuweisen, und damit das Strahlengebiet bis auf Wellenlängen von mehreren Metern zu erweitern. Damit hat die wissenschaftliche Streitfrage ihre

Lösung gefunden, ob das durch Reflexion linear polarisierte Licht senkrecht zur Polarisationsebene schwingt, wie Fresnel annahm, oder parallel zu ihr, wie Franz Neumann behauptete. Nach Maxwells' elektromagnetischer Lichttheorie treten nämlich die elektrischen und magnetischen Wellen immer gleichzeitig auf, und jede derselben würde die fehlende Schwingungsart nach den Gesetzen der Induction sofort wieder hervorrufen. Wie sich die elektrischen Ströme und die Kraftlinien des magnetischen Feldes immer rechtlinig schneiden, so stehen auch in jedem polarisierten Lichtstrahle die elektrischen und die magnetischen Transversalwellen des Äthers aufeinander senkrecht, und daher gibt es in jedem linear polarisierten Strahle sowohl Schwingungen, die auf der Polarisationsebene senkrecht stehen, wie auch solche, die zu ihr parallel sind. Bei der Spiegelung sind die auf ihr senkrecht stehenden die elektrischen, die parallelen die magnetischen Schwingungen. Bei den doppelt brechenden Körpern bildet die magnetische Wellenfläche die Kugelwelle, von welcher der ordentliche Strahl ausgeht, während die elektrische Wellenfläche sich entsprechend der Verschiedenheit der Diëlektricitätsconstanten in der Richtung der einzelnen Achsen nicht in Kugelwellen ausbreitet und dadurch zur Entstehung des außerordentlichen Strahles Veranlassung gibt. Im ordentlichen Strahle rufen aber die magnetischen durch Induction sofort elektrische, im außerordentlichen die elektrischen Wellenbewegungen magnetische hervor, die auf jenen senkrecht stehen; da also immer beide auftreten, so ist damit nicht nur die Streitfrage zwischen Fresnel und Neumann entschieden, sondern auch die Erscheinung begründet, wie aus Schwingungen der einen Art sofort die der anderen hervorgehen können. Das sind die Grundzüge der elektromagnetischen Lichttheorie.

Röntgen- und Becquerelstrahlen.

Röntgenstrahlen. Die eingehende Behandlung, welche die Wellentheorie des Lichtes an und für sich und speciell im Sinne der elektromagnetischen Lichttheorie erfahren hat, schließt die Möglichkeit longitudinaler Strahlungen keineswegs aus, vielmehr haben sich Strahlungen nachweisen lassen, die viele für die Transversalwellen charakteristische Eigenschaften nicht oder wenigstens nicht in dem Maße zeigen, dass man sie mit Sicherheit als solche betrachten kann. Andererseits kann man bei denselben auch Wirkungen beobachten, die darauf hindeuten, dass sich dabei außerordentlich fein vertheilte Massen dem Trägheitsgesetze entsprechend geradlinig fortbewegen und nur äußerlich an transversal schwingende Wellenbewegungen erinnern. Bei fortschreitender Verdünnung eines in einer Glasröhre eingeschlossenen Gases erfolgen die elektrischen Entladungen bei derselben Spannung bis auf immer größere Entfernungen, und zugleich tritt allmählich an die Stelle der büschel- und bandförmigen Funkenströme ein grünlich strahlendes, von der negativen Elektrode ausgehendes Licht, welches stark fluorescierend wirkt, das sogenannte Kathodenlicht. Mit den Eigenschaften dieser Strahlen hat sich zuerst Hittorf im Jahre 1869 und später (1879) Crookes beschäftigt. Im Jahre 1895 entdeckte endlich Professor Röntgen in Würzburg „eine neue Art von Strahlen", welche durch die Kathodenstrahlen an der inneren Glasoberfläche der sogenannten Crookes'schen oder Hittorf'schen Röhren hervorgerufen werden. Da dieselben auf die lichtempfindliche Schichte der photographischen Platte einzuwirken vermögen, so kann man sie wenigstens insoferne zur Herstellung von „Bildern" verwenden, als für diese Strahlen manche Körper mehr, andere wieder weniger durchlässig sind und daher aus ihren Schattenwirkungen erkenntlich werden. Ein mit Bariumplatincyanür überzogener Schirm sendet dort, wo er von solchen Strahlen getroffen wird, ein grünliches Licht aus, und deshalb kann man auch auf einem solchen Schirme aus den verschieden abgestuften Schatten die Formen der projicierten Körper erkennen, obwohl die Strahlen selbst, welche diese Wirkung hervorbringen, nicht sichtbar sind. Besonders charakteristisch ist für diese Strahlen das Durchdringungsvermögen bei verschiedenen Körpern, die sich den Lichtstrahlen gegenüber ganz anders verhalten. Daher scheinen von diesen

Strahlen getroffen, viele Körper durchsichtig, die wir uns gewohnheitsmäßig als undurchsichtig vorstellen. Im hohen Grade durchlässig sind für die Röntgenstrahlen Papier, Carton, Holz, Tuch und die meisten organischen Substanzen, während die Metalle fast undurchlässig sind. Da für diese Strahlen Haut und Fleisch viel durchlässiger sind als das Blut und die Knochen, so kann man mit Hilfe derselben besonders letztere im lebenden Körper gut sichtbar machen und zugleich nicht nur die Lage undurchlässiger Fremdkörper beobachten, sondern auch abnorme Bildungen, gewaltsame Zerstörungen und verschiedene Krankheitssymptome wahrnehmen. Eine für die Natur dieser Strahlen charakteristische Erscheinung ist endlich die, dass sie aus größerer Entfernung ein negativ geladenes und vollständig isoliertes Elektroskop zu entladen vermögen, was sich nur durch vorübergehende Berührung mit kleinen, positiv geladenen Massen gut erklären lässt.

Becquerel entdeckte im Jahre 1896, dass manche Mineralien wie das in Sachsenwald und Přibram vorkommende Uranpecherz die Eigenschaft haben, auch ohne äußere Erregung eine Art von Strahlen auszusenden, die sich in mancher Hinsicht ähnlich verhalten, wie die Röntgenstrahlen; man bezeichnet solche Mineralien und gleichartig beschaffene künstliche Präparate als radioactiv. Diese sogenannten Becquerelstrahlen haben wie die Röntgenstrahlen die Fähigkeit, auf die photographische Platte zu wirken, sie werden ferner durch Magnete von ihrer Richtung abgelenkt und beeinflussen die Elektroden eines Funkeninductoriums in der Weise, dass das Auftreten oscillatorischer Entladungen wesentlich erleichtert wird. Sie haben endlich auch die Eigenschaft, dass sie ein vollkommen isoliertes Elektroskop zu entladen vermögen.

Drahtlose Telegraphie.

Beim elektrischen Telegraphen werden beide Stationen durch einen guten Leiter miteinander verbunden, damit der in der einen Station geschlossene Strom an der zweiten Station eine elektromagnetische Wirkung ausüben kann. Die transversalen Aetherwellen pflanzen sich aber auch ohne einen guten Leiter, ja geradezu ausschließlich in Nichtleitern fort und bedürfen zu ihrer Ausbreitung ebensowenig wie das Licht eines geschlossenen Stromkreises. Um so auf größere Entfernungen eine Verständigung zu ermöglichen, müssen zunächst sehr kräftige, weithin sich ausbreitende Wellen erregt und Apparate construiert werden, welche die Ankunft solcher Wellen deutlich und sicher anzeigen. Als Wellenerreger eignet sich der von Professor Righi in Bologna construierte „Oscillator", der aus vier in gerader Linie aufgestellten Metallkugeln besteht, zwischen welchen sich jedesmal ein Funkenstrom einstellt, wenn der Primärstrom eines Inductoriums geschlossen wird, oder man verwendet einen längeren stabförmigen Leiter, der an der Funkenstrecke eines Inductoriums endigt. Die Fortpflanzungsrichtung der Wellen steht auf der Reihe der Funkenstrecken oder auf der Richtung des stabförmigen Leiters senkrecht. Als „Empfänger" benützte zuerst der italienische Ingenieur Marconi den vom französischen Physiker Branly erfundenen „Cohärer" oder „Fritter", eine Glasröhre von wenigen mm Durchmesser, innerhalb welcher die Zuleitungsdrähte einer galvanischen Batterie durch locker aneinandergereihte Metallspäne miteinander verbunden sind. Unter dem Einfluss der elektrischen Wellen schließen sich dieselben so gut aneinander, dass der früher sehr große Widerstand auf wenige Ohm herabsinkt, worauf die Batterie sofort einen entsprechenden Strom gibt. Sobald die Frittröhre auch nur leise erschüttert wird, nimmt mit der Leitungsfähigkeit auch die Stromstärke ab. Diese Wirkung tritt viel sicherer ein, wenn sich die Frittröhre am Ende eines zum „Sender" parallelen Leiters von gleicher Länge befindet. So oft also im Sender durch Niederdrücken eines Tasters der Funkenstrom hervorgerufen wird, bewirken die elektrischen Wellen im Stromkreise des Fritters eine sofortige Verstärkung des Stromes, dass wenigstens mit Hilfe eines „Relais" in einem zweiten Stromkreis ein Morseapparat in Bewegung gesetzt werden kann.

Derartige Apparate gestatten bereits eine Verständigung zwischen Punkten, die mehr als 50 km voneinander entfernt sind, und in besonders günstigen Fällen wurde auch schon eine Entfernung von mehr als 100 km überwunden. Der Wert dieser Erfindung liegt nicht nur darin, dass die mit der Herstellung einer Telegraphenleitung verbundenen Kosten und die hiezu nöthige Zeit und Mühe erspart bleiben, sondern es wird dadurch vor Allem die Sicherheit des Verkehres gerade dann wesentlich gehoben, wenn Elementarereignisse jeden anderen Verkehr ausschließen.

———o———

Kosmische Physik.

In den vorausgegangenen Abschnitten der Naturlehre haben wir die Körper oder die an ihnen wahrgenommenen Erscheinungen immer nur nach einer Richtung, also entweder nur hinsichtlich ihrer mechanischen, ihrer thermischen, magnetischen, elektrischen oder ihrer optischen Eigenschaften untersucht. Wenn wir statt der einzelnen Objecte die Natur als Ganzes zum Gegenstande unserer Beobachtung machen, so empfiehlt es sich, das ganze Weltall in drei Hauptgebiete zu zergliedern, nämlich in die außerhalb des Erdballes liegende Sternenwelt, welche den Gegenstand der Astronomie und der Astrophysik bildet, den Erdball als solchen behandeln wir hinsichtlich seiner physikalischen Eigenschaften in der Geophysik, und in der Physik der Atmosphäre oder in der Meteorologie lernen wir die mannigfachen Vorgänge kennen, die sich in der Lufthülle abspielen.

Jeder dieser Wissenszweige hat sich bereits zu einer umfangreichen Specialwissenschaft ausgebildet, und alle drei zusammen bilden das Gebiet der kosmischen Physik. Ihre Behandlung setzt daher naturgemäß die Kenntnis aller bisher behandelten Gebiete der Physik voraus und verleiht auch der Naturlehre einen gewissen Abschluss, indem sie die gefundenen Naturgesetze auf das ganze unseren Sinnen zugängliche Weltall anwendet.

Astronomie und Astrophysik.

Die erste Anregung zur genaueren Beobachtung des Laufes der Gestirne gab die Nothwendigkeit der Zeitrechnung, und zwar sowohl innerhalb eines Tages, wie auch des Jahres, und schließlich die historische Zeitrechnung. Die klimatologischen Verhältnisse der ältesten Culturländer waren sehr geeignet, dass sich die astronomischen Kenntnisse bis zu einem gewissen Grade schon frühzeitig entwickeln und auch auf die mathematische Begriffsbildung fördernd einwirken konnten. Die Chinesen wussten 2700 Jahre v. Chr. den Lauf der Sonne und des Mondes so genau anzugeben, dass sie Finsternisse vorausbestimmen konnten, und auch bei den Griechen hat Thales von Milet schon um das Jahr 609 v. Chr. eine Sonnenfinsternis auf Grund seiner Beobachtungen vorhergesagt. In der vorchristlichen Ära zeichnete sich noch Hipparchos auf Rhodos (180—125 v. Chr.) durch seine gründlichen Kenntnisse der damaligen Sternkunde aus, und der alexandrinische Astronom Claudius Ptolemäus (87—165 n. Chr.) stellte bereits eine Theorie der Planetenbewegung auf, die bedeutende mathematische Hilfsmittel in Anspruch nimmt. Noch um das Jahr 1460 lehrten in Wien Georg von Peurbach und Regiomontanus die Mathematik und die Astronomie im Anschlusse an den „Almagestus Ptolemäi“, einem Werke des oben erwähnten Ptolemäus, das zuerst vom Griechischen ins Arabische und dann erst ins Lateinische übersetzt worden war. Diesen beiden Mathematikern war es beschieden, einen Schüler heranzubilden, der den Unterbau zu einem neuen Sonnensysteme schuf und damit die ganze Astronomie, wie auch die Physik in neue Bahnen lenkte. Es war dies Nicolaus Copernicus (Koppernigk) aus Thorn, der zuerst in Krakau Medicin studiert hatte, später in Wien hauptsächlich Mathematik und schließlich in Bologna und Rom Astronomie betrieb. In seine Heimat zurückgekehrt, arbeitete er als Domherr von Frauenburg 23 Jahre (1507—1530) an seinem Werke „De revolutionibus“, in welchem er die Sonne als den ruhenden

Centralkörper hinstellte und alle damals bekannten Planeten in der richtigen Reihenfolge kreisförmige Bahnen um sie beschreiben ließ. Es war ihm auch nicht entgangen, dass die Entfernung der Erde von der Sonne nicht constant sei, er schrieb aber diese Veränderlichkeit einer excentrischen Stellung der Sonne zu. Das dem Papste Paul III. gewidmete Werk erschien erst unmittelbar vor seinem Tode 1543. Galileo Galilei, der zuerst in seiner Heimat Pisa und dann in Padua Mathematik und Physik lehrte, entwickelte zugleich die Grundbegriffe der Bewegungslehre. Der dritte hervorragende Förderer war Johannes Kepler, der Gehilfe und Nachfolger des dänischen Astronomen Tycho Brahe. Sein Hauptverdienst besteht in der Vervollständigung des copernicanischen Sonnensystems durch die Aufstellung der nach ihm benannten Gesetze. Auf Grund der von Tycho Brahe begonnenen Marsbeobachtungen stellte er (1609) die elliptische Form der Planetenbahnen fest. Ferner entdeckte er den Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit des Planeten und seiner Entfernung vom Centralkörper, und im Jahre 1618 formulierte er endlich das Gesetz, wie die Umlaufszeit eines Planeten von seiner Entfernung von der Sonne abhängt. Es hat einen harten Geisteskampf gekostet, ehe der nur von wenigen durchschaute Himmelsmechanismus allgemeine Anerkennung fand, denn die der nächsten Umgebung entnommenen sinnlichen Eindrücke, die für die Ruhe des Erdballes zu sprechen schienen, standen zu den ganz abstracten Beweisführungen des stürmisch vorauseilenden Galilei in einem allzu schroffen Gegensatze. Directe physikalische Beweise für die progressive Bewegung der Erde lieferten erst Olaf Römer (1676) durch die Berechnung der Lichtgeschwindigkeit, und Bradley (1727) durch die Erklärung der Aberration; die drehende Bewegung der Erde wies Leon Foucault durch seinen Pendelversuch (1851) nach.

Die Ortbestimmung am Himmel.

Schon beim oberflächlichen Anblicke des Sternenhimmels bemerken wir, dass alle Himmelskörper in einer gemeinsamen Bewegung begriffen sind und dass weitaus die meisten derselben gegenseitig immer dieselbe Entfernung beibehalten. Nur ein

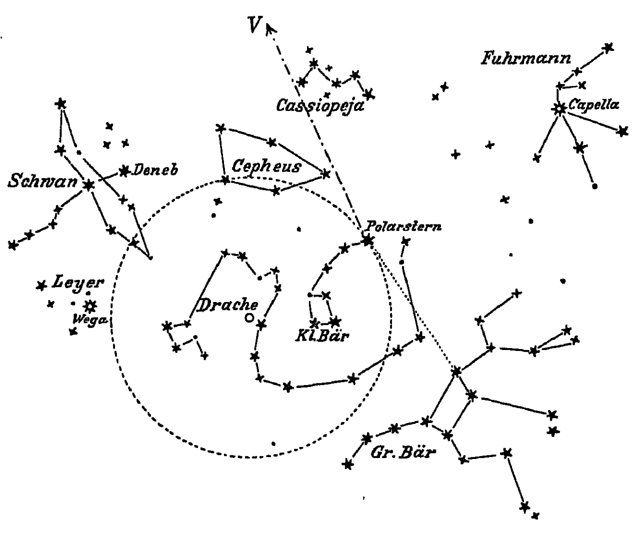


Fig. 344.

größerer Stern am nördlichen Himmel, der Polarstern, verbleibt immer in derselben Stellung. Um rasch einen bestimmten Punkt am Himmel bezeichnen zu können, hat man einzelne Gruppen besonders hell leuchtender Sterne zu „Sternbildern“ oder „Zeichen“ vereinigt und mit eigenen Namen belegt, die vielfach der Thierwelt oder dem Culturleben der alten Völker entnommen sind. Sehr bekannte Sternbilder am nördlichen Himmel sind besonders der große und der kleine Bär, weil deren Kenntnis für die sofortige Auffindung des Polarsternes von besonderer Wichtigkeit ist.

Einige andere in der Nähe befindliche Sternbilder ergeben sich aus der Fig. 344. Sonne und Mond lassen sich in diese Sternbilder nicht einreihen, denn sie treten bald in diesem, bald in jenem Sternbilde auf, und man sagt z. B., die Sonne befindet sich im Sternbilde des Widders u. s. w. Die einzelnen Sternbilder, welche die Sonne im Laufe des Jahres durchwandert,

Sunt Aries, Taurus, Gemini, Cancer, Leo, Virgo,
Libraque, Scorpius, Arciteneus, Caper, Amphora, Pisces.

Die dafür gebräuchlichen Zeichen sind:

Man bezeichnet die Reihenfolge dieser Sternbilder als den Thierkreis oder Zodiacus. In den Kalendern wird die Zeit, wenn sich die Sonne oder der Mond in dem betreffenden Zeichen befindet, durch obige Figuren angegeben. Diese Bezeichnungen giengen später auf die 12 gleichen Bogenstücke eines Kreises am Himmel über, stimmen jedoch mit den Sternbildern selbst nicht mehr überein.

Nebst der zur vorläufigen Orientierung sehr gut brauchbaren Ortsbestimmung durch die Sternbilder verwendet man in der Astronomie zwei verschiedene Coordinatensysteme. In beiden betrachtet sich der Beobachter als den Mittelpunkt einer Kugel, auf deren Oberfläche sich die Sterne befinden. Zum ersten dieser beiden Coordinatensysteme gelangen wir auf folgendem Wege. Durch den Beobachtungsort B (Fig. 345) legen wir eine horizontale Ebene $SWNO$, welche das Himmelsgewölbe im Horizonte schneidet. Die Senkrechte in B trifft das Himmelsgewölbe im Zenith Z. Sein Gegenpunkt auf der Himmelskugel heißt Nadir. Legen wir durch den Zenith und durch ein Gestirn G einen größten Kugelkreis, der den Horizont in A trifft, so können wir zur Bestimmung der Lage des Punktes G sowohl den Winkel $ZBG = z$, also die Zenithdistanz, wie auch den Winkel $ABG = h$, also die Höhe des Sternes messen: es ist daher $h + z = 90^0$. Um die Lage dieses Sternes von anderen mit derselben Zenithdistanz zu unterscheiden, müssen wir die Lage des Fußpunktes A auf dem Horizonte bestimmen. Zu diesem Zwecke legen wir durch den Zenithpunkt Z und den Polarstern P einen größten Kugelkreis, den Meridian, der auf der Seite des Nordpoles den Horizont im Nordpunkte N und auf der entgegengesetzten Seite im Südpunkte S schneidet. Wir messen den Winkel $SBA = a$ und bezeichnen denselben als das Azimut. Während für die Zenithdistanz und Höhe nur Werte von 0 bis 90^0 in Anwendung kommen, zählt man das Azimut, von Süden ausgehend, über Westen, Norden und Osten bis 360^0.

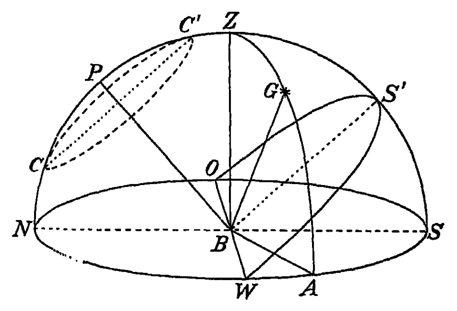


Fig. 345.

Das zweite Coordinatensystem ergibt sich, indem wir durch den Beobachtungspunkt B eine Ebene legen, die auf der Richtung nach dem Pole senkrecht steht und das Himmelsgewölbe im Himmelsäquator $OS'W$ und den Horizont in der Geraden OBW schneidet. Alle Fixsterne beschreiben täglich einen zum Himmelsäquator parallelen Kreis. Wenn derselbe vollständig oberhalb des Horizontes liegt, wie z. B. CC', so nennt man einen solchen Stern Circumpolarstern; wird aber seine Bahn vom Horizonte durch-

schnitten, so zerfällt sie in einen oberhalb des Horizontes liegenden „Tagbogen" und in den unterhalb desselben liegenden „Nachtbogen".

Stellen wir ein Fernrohr F (Fig. 346) so auf, dass sich sein Träger AB um eine nach dem Pole P gerichtete Achse dreht, so wird ein Stern auf dem Himmelsäquator immer in der Mitte des Gesichtsfeldes verbleiben, wenn die optische Achse des Fernrohres die Stellung BD einnimmt und sich die Achse AB mit derselben Geschwindigkeit von Osten nach Westen dreht wie der Stern auf dem Himmelsäquator. Man bezeichnet ein solches Fernrohr als ein Äquatorial. Richten wir dieses Fernrohr nach einem außerhalb des Himmelsäquators befindlichen Sterne G, so ist der Winkel $p = GBP$ die Poldistanz, und $\delta = DBG$ die Declination, und es ist $p + \delta = 90^0$.

Legen wir einen größten Kugelkreis durch den Pol P und durch das Gestirn G (Fig. 347), so schneidet dieser den Himmelsäquator im Punkte D, und der zwischen diesem Stunden-

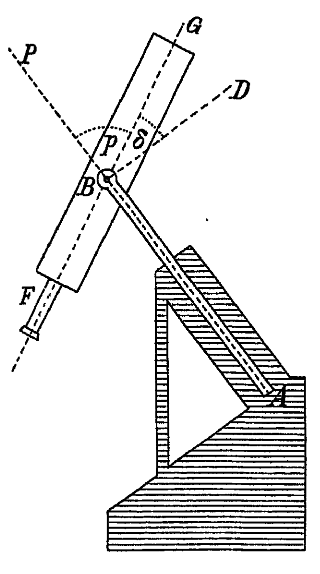


Fig. 346.

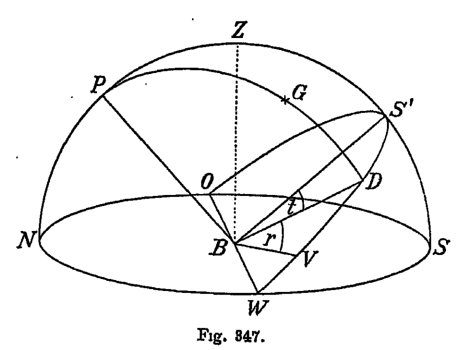


Fig. 347.

oder Declinationskreise und dem Meridiane liegende Bogen DS' heißt Stundenwinkel (t). Dieser Bogen wächst nämlich proportional mit der Zeit, die seit der „Culmination", d. h. seit dem Augenblicke verstrichen ist, als der Stern den Meridian passierte. Wenn wir aber die Stellung dieses Punktes D unabhängig von der Culmination angeben wollen, so müssen wir seine Entfernung von einem Punkte des Äquators bestimmen, der sich mit den Fixsternen fortbewegt. Hiezu verwendet man den Punkt, in dem die Sonne im Frühlinge den Himmelsäquator durchsetzt, und bezeichnet denselben als den Frühlingspunkt V. Auf einer Sternkarte finden wir ihn, wenn wir vom Polarsterne aus einen größten Kugelkreis in der Richtung PV ziehen

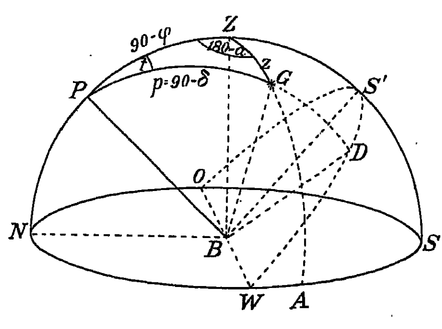


Fig. 348.

(Fig. 344), der ungefähr über den Stern β des Sternbildes Cassiopeia und nahe am Sterne α des Sternbildes Andromeda vorübergeht. Die Entfernung des Punktes D vom Frühlingspunkte, also den Winkel $r = VBD$, nennt man Rectascension des Sternes G. Er wird, wie der Stundenwinkel, im

Sinne Westen-Süden-Osten von 0 bis 360° gezählt. Die Summe beider Winkel $r + t = VBS' = \tau$ bezeichnet man als Sternzeit, und es ist demnach $t = \tau - r$.

Ist die Lage eines Gestirnes durch die Coordinaten des einen Systemes gegeben, so kann man die des anderen Coordinatensystemes daraus berechnen, da im sphärischen Dreiecke PGZ (Fig. 348) $PZ = 90^0 - \varphi$ durch Bestimmung der Polhöhe gefunden wird, und z und a aus $90 - \varphi$, t und $p = 90^0 - \delta$, oder t und p aus $90 - \varphi$, a und z nach den Regeln der sphärischen Trigonometrie berechnet werden können.

Die tägliche Bewegung der Gestirne ist die Folge der Drehung der Erde um ihre eigene Achse, die durch den Foucault'schen Pendelversuch direct erwiesen werden kann. Würde nämlich am Nordpol ein nach allen Richtungen bewegliches Pendel in einer bestimmten Ebene schwingen (Fig. 349)

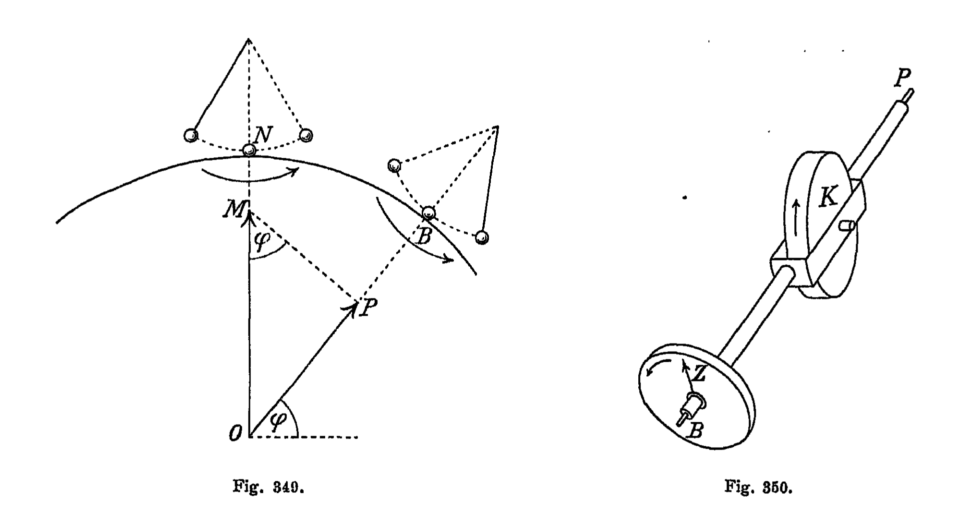


Fig. 349. Fig. 350.

so müsste sich dieselbe scheinbar in einem Tage um einen vollen Winkel drehen, während wir aus dem Trägheitsgesetze schließen müssen, dass das Pendel die Schwingungsebene nicht ändern kann, also die Erde sich im entgegengesetzten Sinne gedreht haben muss. Wenn wir diesen Versuch in unserer geographischen Breite ausführen, so kommt innerhalb gewisser Grenzen für die Drehung der Schwingungsebene nur die Componente OP der Umdrehungsgeschwindigkeit OM zur Geltung, weshalb die Drehung entsprechend langsamer erfolgt. In Äquatorialgegenden verschwindet sie vollends. Ein ununterbrochen rotierender Kreisel (Fig. 350) würde auf eine nach dem Polarsterne gerichtete und daher zur Erdachse parallele Achse BP so einwirken, dass sich der Zeiger Z mit derselben Drehungsgeschwindigkeit von Osten nach Westen zu drehen scheint, mit der sich in Wirklichkeit die Erde von Westen nach Osten dreht. Zu dieser täglichen Bewegung aller Gestirne kommen aber bei der Sonne, beim Monde und bei den Planeten noch andere Bewegungen hinzu, wodurch ihre scheinbare Bahn sehr compliciert wird.

Die Entfernung der Erde von den nächsten Himmelskörpern. Sind A und B (Fig. 351) zwei Beobachtungsorte der Erde, die auf demselben Meridiane liegen, und z und z' die ihnen entsprechenden Zenithdistanzen des Mondmittelpunktes während der Culmination, so kennen wir im Viereck $AEBM$ alle Winkel, da $AEB = \varphi + \varphi'$ die Summe der geographischen Breiten darstellt und der Winkel ψ bei M aus den drei übrigen berechnet werden kann. $\psi = (z + z') - (\varphi + \varphi')$.

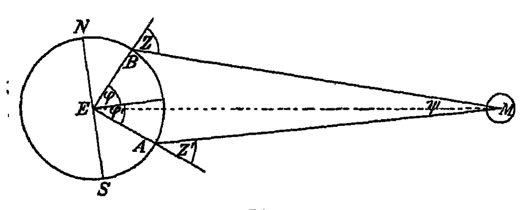


Fig. 351.

Mit Hilfe des Erdradius lässt sich auf trigonometrischem Wege die Strecke EM, also die Entfernung des Mondes d berechnen, und man findet $d = 60{\cdot}27 \,.\, r = 384000$ Km $= 3{\cdot}84 \,.\, 10^{10}$ cm. Das Licht braucht also etwas mehr als eine Secunde, um vom Monde zur Erde zu gelangen. Den Winkel $p = AMB$ (Fig. 352), welchen die an die Erde gezogene Tangente mit der Verbindung der Mittellinie NM einschließt, bezeichnet man als Horizontalparallaxe oder tägliche Parallaxe, weil der Punkt A vom Monde aus

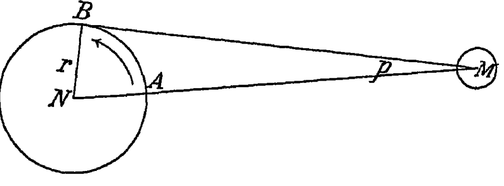
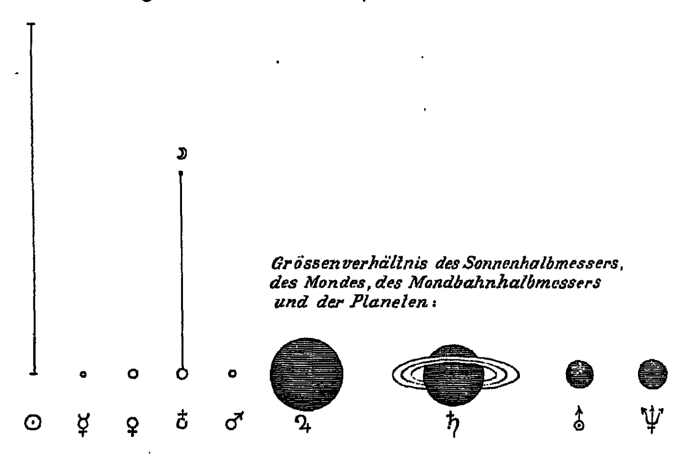


Fig. 352.



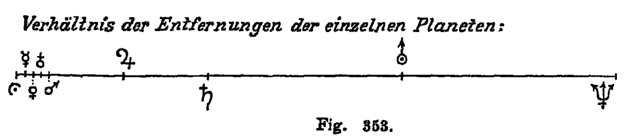


Fig. 353.

gesehen den Winkel NMB infolge der täglichen Erdbewegung beschreibt. Dieser Winkel, der für den Mond 57′ beträgt, ist für einen Punkt auf dem

Monde die scheinbare Größe des Erdradius. Andererseits lässt sich aus der scheinbaren Größe des Mondes und seiner Entfernung d sein Halbmesser r' berechnen; so finden wir

$$r' = d \,.\, \mathrm{tang}\, 15'\, 33'' = 60{\cdot}27 \,.\, r \,.\, \mathrm{tang}\, 15'\, 33'' = 0{\cdot}273 \,.\, r = 1740 \text{ km}.$$

In Fig. 352 entsprechen die beiden Kreise dem Größenverhältnisse von Erde und Mond.

Die tägliche Parallaxe lässt sich auch für die Planeten und für die Sonne messen. Für letztere beträgt sie 8·88″. Da für so kleine Winkel die Tangente der Bogenlänge proportional ist, so verhält sich die Entfernung der Sonne x zu der des Mondes d wie die Mondparallaxe zur Sonnenparallaxe, und daher ist $x : d = 57' : 8{\cdot}88'' = 385$; mithin ist $x = 385 \,.\, d = 15 \,.\, 10^{12}$ cm. Der scheinbare Durchmesser der Sonne beträgt durchschnittlich 32′, weshalb ihr Radius $R = 15 \,.\, 10^{12} \,.\, \mathrm{tang}\, 16' = 7 \,.\, 10^{10}$ cm. Er ist also fast doppelt so groß als die Entfernung des Mondes von der Erde. Wenn wir in analoger Weise für die einzelnen Planeten aus den täglichen Parallaxen ihre Entfernungen und dann aus ihrer scheinbaren Größe ihre wirkliche Größe berechnen, so ergeben sich die Größenverhältnisse, wie sie in Fig. 353 dargestellt sind.

Die scheinbare Bewegung der Sonne.

Blicken wir, in einem Eisenbahnwagen sitzend, in die Richtung der Bewegung, so scheinen die in der Nähe der Bahn befindlichen Gegenstände während der Fahrt rascher zurückzuweichen als die entfernteren. Dabei ziehen wir aus dem Zurückweichen der Gegenstände zunächst den Schluss, dass wir uns nach vorne bewegen und zweitens, dass ein Körper um so näher sei, je schneller er sich zurückbewegt. Blicken wir durch ein Äquatorial nach dem Fixsternhimmel und es bleibt ein Stern in der Richtung nach Osten zurück, während die Fixsterne ihre Stellung im Gesichtsfelde beibehalten, so können wir daraus schließen, dass wir uns im Vergleich zu diesem Sterne nach Westen bewegen. Das trifft thatsächlich bei der Sonne zu. Betrachten wir die Sonne an zwei aufeinanderfolgenden Tagen, so finden wir, dass sie hinter einem Fixsterne, mit dem sie am vorhergehenden Tage culminierte, durchschnittlich um 59′ zurückbleibt. Dass wir uns wirklich im Weltraume fortbewegen, das ergibt sich unmittelbar erst aus der Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit nach Olaf Römer, welche ja in gleicher Weise eine endliche Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes, wie auch die progressive Bewegung der Erde voraussetzt. Auch die Erklärung der Aberrationserscheinung durch Bradley setzt nicht nur eine gewisse Geschwindigkeit des Lichtes, sondern auch eine solche für die Erdbewegung voraus. Da sich jetzt die Lichtgeschwindigkeit sogar aus Versuchen ermitteln lässt, die im Laboratorium angestellt werden, so können wir daraus die Geschwindigkeit der Erde in ihrer Bahn berechnen, die in runden Zahlen 30 ($\mathrm{Km\, sec^{-1}}$) $= 3 \,.\, 10^6$ ($\mathrm{cm\, sec^{-1}}$) beträgt. Der Winkel, den der Radiusvector der Erde an einem Tage beschreibt, ist also bei einer Entfernung von $15 \,.\, 10^{12}$ cm gleich $\frac{\text{Bogen}}{\text{Radius}} = \frac{3 \,.\, 10^6 \,.\, 60 \,.\, 60 \,.\, 24}{15 \,.\, 10^{12}} = 0{\cdot}017 = 59'$. Die Erde muss sich also mit dieser Geschwindigkeit im gleichen Drehungssinne um die Sonne bewegen, in welchem sie sich um die eigene Achse dreht.

Dass sich die Erde in einer elliptischen Bahn um die Sonne bewegt, folgt aus dem Umstande, dass der scheinbare Durchmesser der Sonne zwischen 31′ 31″ und 32′ 35″ schwankt und verkehrt proportional zu- und abnimmt, wie der vom Brennpunkte einer Ellipse ausgehende Radiusvector. Damit ist das erste Kepler'sche Gesetz bestätigt. Das zweite ergibt sich daraus, dass die Sonne den Fixsternen gegenüber im December um 4′ 4″ zurückbleibt, während die Sonne einen Durchmesser von 32′ 35″ hat, dass sich also die Erde in der Sonnennähe schneller bewegt als bei der größten Entfernung der Sonne im Juni, wo ihre scheinbare Größe 31′ 31″ beträgt und die Sterne ihr um 3′ 5″ täglich vorauseilen.

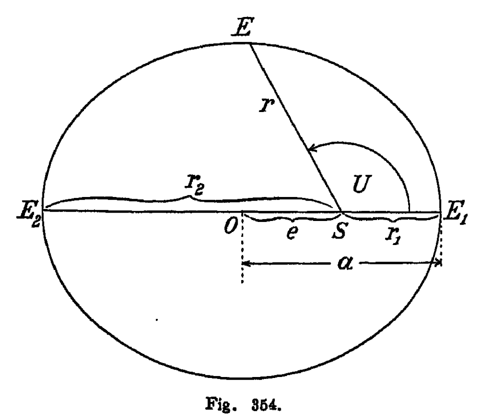


Fig. 354.

Ist r die Entfernung der Erde von der Sonne, $\varepsilon = \frac{e}{a}$ und $p = r$, wenn r auf a senkrecht steht (Fig. 354), so gilt für alle Punkte der Erdbahn die Gleichung $r = \frac{p}{1 + \varepsilon \cos U}$. Nachdem der Radiusvector r dem scheinbaren Durchmesser der Sonne δ nahezu proportional ist, also $r = K . \delta$, so erhalten wir für die geringste Entfernung, oder für das Perihel

$$\text{wo } U = 0,\ r_1 = K . 31' 31'' = K . 1891'' = \frac{p}{1 + \varepsilon}$$

und für die größte Enfernung oder für das Aphel,

$$\text{wo } U = 180^0,\ r_2 = K . 32' 35'' = K . 1955'' = \frac{p}{1 - \varepsilon};$$

daraus folgt unmittelbar $\frac{1891}{1955} = \frac{1 - \varepsilon}{1 + \varepsilon}$ und daher $\varepsilon = \frac{1955 - 1891}{1955 + 1891} = 0{\cdot}0167$; damit haben wir einen angenäherten Wert für die astronomische Excentricität $\varepsilon = \frac{e}{a}$ gefunden, aus dem sich mit Hilfe von a die lineare Excentricität der Ellipse e und die übrigen Größen berechnen lassen.

Die Länge des Jahres. Nachdem sich die Sonne am 21. März mit dem Frühlingspunkte am Himmel gedeckt hat, bleibt sie hinter demselben immer mehr zurück, und nach 365·2422 Tagen fällt sie wieder mit ihm zusammen. Diesen Zeitraum bezeichnet man als ein tropisches Sonnenjahr. Von der genauen Kenntnis dieses Zeitraumes hängt die Richtigkeit der Zeitrechnung ab. Rechnet man wie im alten Rom mit 365 Tagen, so zählt man alle 4 Jahre einen Tag zu wenig. Daher fiel der Jahreswechsel zur Zeit Julius Cäsars bereits in den Spätherbst hinein, weshalb dieser eine Kalenderreform in dem Sinne durchführte, dass er im Jahre 46 v. Chr. G. (anno confusionis) 67 Tage einschaltete. Ferner bestimmte er, dass fortan auf jedes vierte Jahr ein Schalttag entfallen soll. Damit hatte man die Jahreslänge auf 365·25 Tage festgesetzt, also einen Wert angenommen, der um 0·0078 Tage zu groß war, und nach je 100 Jahren wurden nunmehr

0·78 Tage zuviel eingerechnet. Von da an verschob sich der Jahreswechsel gegen das Frühjahr hin. Diese Zeitdifferenz hat man bereits auf dem Concil zu Nicaea bemerkt, und auch der gelehrte Roger Baco († 1294) wies auf die Nothwendigkeit einer diesbezüglichen Correctur der Zeitrechnung hin. Der zu diesem Zwecke nach Rom berufene Regiomontanus wurde nur durch den Tod daran verhindert, die Kalenderreform auszuarbeiten. Auch die von Copernicus in diesem Sinne gemachten Vorarbeiten gelangten nicht zum Abschlusse, dienten aber doch als Grundlage für die vom Papst Gregor XIII. durchgeführte Kalenderreform, indem er in der Bulle vom 24. Februar 1581 bestimmte, dass auf den 4. October 1582 sofort der 15. October folgen soll. Ferner wurde in derselben festgestellt, dass der Schalttag in den Säcularjahren zu entfallen habe, aber in den Säcularjahren, deren Zahl durch 400 theilbar ist, soll der Schalttag verbleiben. Diese Bestimmung entspricht einer Jahreslänge von

$$365 + \frac{25}{100} - \frac{3}{400} = 365{\cdot}25 - 0{\cdot}0075 = 365{\cdot}2425$$

Tagen und führt daher erst nach 10000 Jahren zu einem Fehler von 3 oder nach 3300 Jahren zu einem Fehler von einem Tage. Diese sogenannte gregorianische Kalenderreform wurde bald in allen christlichen Ländern eingeführt, nur Russland behält noch immer den Julianischen Kalender bei und hat bereits eine Datumsdifferenz von 13 Tagen, weshalb z. B. auf den 14. April 1901 unserer Zeitrechnung bei ihnen der 1. April fiel.

Die mittlere Sonnenzeit. Da die Erde ihre elliptische Bahn um die Sonne bald mit ungleichförmig beschleunigter, bald mit verzögerter Bewegung zurücklegt, so ist auch die scheinbare Bewegung der Sonne keine gleichförmige. Ihr Einfluss auf das bürgerliche Leben zwingt uns aber dennoch, ihre Auf- und Untergänge zur Zeitmessung zu benützen. Würde sich die Erde mit gleichförmiger Geschwindigkeit auf kreisförmiger Bahn um die Sonne bewegen, so würden wir statt der „wahren Sonne“, die nur für die Zeitrechnung angenommene „mittlere Sonne“ auf- und untergehen sehen, und diese würde das ganze Jahr hindurch um $360^0 : 365{\cdot}2422 = 59'$ hinter den Fixsternen zurückbleiben. Die so entstehende Differenz zwischen der „wahren“ und „mittleren“ Sonnenzeit bezeichnet man als die Zeitgleichung. Sie beträgt am 1. Jänner 3′ 54″, steigt bis 10. Februar auf 14′ 26″ an, wird am 16. April gleich Null, hierauf negativ, und sinkt bis — 3′ 50″, ändert am 15. Juni wieder ihr Zeichen und steigt bis zum 25. Juli auf 6′ 17″. Am 31. August ist sie wieder gleich Null, nimmt bis 2. November ab, und ist an diesem Tage — 16′ 20″. Die positiven Werte müssen zum Zeitmaße, das der „wahren Sonne“ entnommen ist, hinzugezählt werden, die negativen werden davon subtrahiert. Unter einem „Sterntage“ versteht man die Zeit, welche von der einen Culmination eines Fixsternes bis zur nächsten vergeht, also die Dauer einer Drehung der Erde um 360^0. Bis die mittlere Sonne ein zweites Mal denselben Meridian passiert, dauert es länger, weil die Sonne täglich um den 365·2422sten Theil des vollen Winkels zurückbleibt. Es entfällt also auf ein Jahr ein Sterntag mehr; daher ist der mittlere Sonnentag im Verhältnisse $366{\cdot}2422 : 365{\cdot}2422 = 1{\cdot}00277$ länger als jener; im gleichen Verhältnisse ist also auch die Stunde, Minute und Secunde des Sonnentages länger als die des Sterntages.

Die Zeitmessung nach der mittleren Sonne bringt es natürlich mit sich, dass jeder Ort, der unter einem anderen Meridiane liegt, auch eine andere

„Zeit“ hat. Diese verschiedenen Uhrenzeiten führen bei einem so lebhaften Verkehre, wie er heutzutage zwischen den entferntesten Orten besteht, besonders aber im Bahnverkehre zu vielen Schwierigkeiten, weshalb für größere Länderbereiche eine gemeinsame Zeit festgestellt wurde. Die mitteleuropäische Zeit entspricht der des 15° östlich von Greenwich, also dem Meridiane, der in Deutschland durch die Stadt Görlitz, in Österreich durch die Stadt Wels geht.

Auf der scheinbaren Bewegung der Sonne beruht die Construction der Sonnenuhren. Diese werden entweder an einer horizontalen oder verticalen Ebene angebracht und folgendermaßen construiert. Der Stab ABP (Fig. 355), dessen Schatten als Zeiger verwendet wird, erhält eine Richtung parallel zur Erdachse und muss also nach dem Nordpol am Himmel gerichtet sein. Legen wir durch den Punkt B eine zu AP senkrechte Ebene, so würde deren Verlängerung den Himmelsäquator treffen, und der auf diese Ebene fallende Schatten beschreibt in jeder Stunde einen Winkel von 15°. Wenn wir die Projection des Stabes AP auf die horizontale Ebene construieren, so erhalten wir in dieser die Mittagslinie oder den Meridian NS. Die Ebene, welche den Meridian und die Strecke AP enthält, schneidet die Äquatorialebene in der Geraden NS'; von dieser Geraden kann man nach beiden Seiten so viele Winkel von 15° auftragen, als den Schattenstellungen der einzelnen Stunden vor und nach Mittag entsprechen. Soll die Sonnenuhr horizontal sein, so müssen wir die Durchschnittspunkte dieser Stundenlinien mit der Geraden CD aufsuchen, um die Stundenlinien auf der horizontalen Ebene zu erhalten; bei der verticalen Ebene PV müssen wir ebenfalls die Durchschnittspunkte der Stundenlinien auf BS' mit der Geraden CD herstellen und mit P verbinden, um die Schattenstellungen für die einzelnen Stunden auf dieser verticalen Wand zu finden.

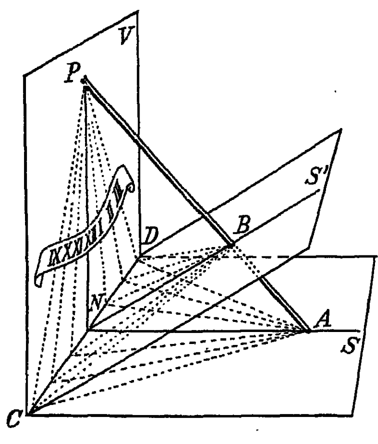


Fig. 355.

Die den Sonnenuhren entnommene „Zeit“ ist die „wahre Sonnenzeit“ und muss erst mittels der „Zeitgleichung“ auf die „mittlere Sonnenzeit“ umgerechnet werden.

Die Ekliptik. Am 21. März und 23. September beschreibt die Sonne infolge der täglichen Achsendrehung der Erde den Himmelsäquator und behält daher immer die

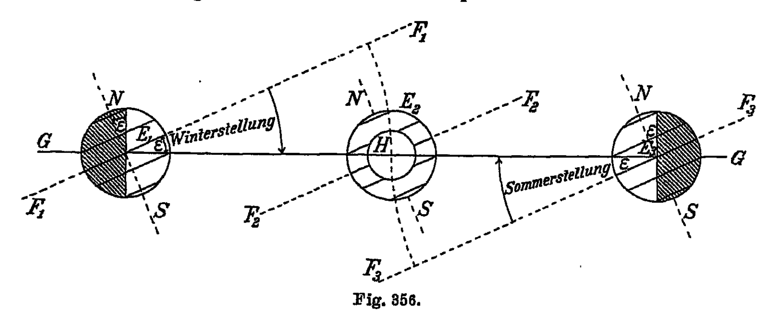


Fig. 356.

Entfernung von 90° vom Polarsterne bei. Während des Sommers entfernt sich die tägliche Sonnenbahn vom Himmelsäquator nach Norden und im Winter nach Süden bis auf $\varepsilon = 23^\circ 27' 32''$. Bei der Stellung E_1 (Fig. 356), wie sie am 21. December zur Zeit des Wintersolstitiums eintritt, sehen wir die Sonne H südlich vom Himmelsäquator F_1F_1 einen dazu parallelen Kreis beschreiben, der also den Horizont südlich vom Ost- und Westpunkt durchschneidet. In der Stellung E_2 am 21. März und 23. September bewegt sich die Sonne H auf dem Himmelsäquator F_2F_2 selbst, und beim Sommersolstitium E_3 am 21. Juni auf einem Kreise parallel zum Himmels-

äquator $F_3 F_3$, aber nördlich von diesem. Hätte die Erde keine Achsendrehung und befände sich die Sonne H am 21. März gerade im Westpunkt am Horizonte, so würde sie täglich um etwa 2 Sonnenbreiten nach Osten fortschreiten und sich am 21. Juni 23° 27′ 32″ nördlich vom Äquator im Meridiane befinden. Hierauf würde sie sich wieder dem Äquator nähernd täglich um 2 Sonnenbreiten weiter nach Osten bewegen und am 23. September genau im Ostpunkte untergehen. Die Bahn, die sie so beschreiben würde, bezeichnet man als Ekliptik und den Winkel ε, den dieselbe mit dem Himmelsäquator einschließt, als die „Schiefe der Ekliptik".

Ist für einen bestimmten Ort der Erde die Zenithdistanz des Poles größer als $90 - \varepsilon = 66° 32' 28''$, so überschreitet die Sonne den Zenith, weshalb sich in diesem Falle der Schatten eines verticalen Stabes auch nach Süden „wendet", wie es in der „tropischen" oder heißen Zone geschieht. Wenn die Zenithdistanz des Poles kleiner als ε ist, so erhebt sich der Himmelsäquator nirgends um den Winkel ε über den Horizont. Es steigt dann die Sonne bei ihrer tiefsten Stellung nicht über den Horizont und geht bei ihrer höchsten Stellung gar nicht unter. Dies trifft für alle Orte der arktischen oder kalten Zone zu. Zwischen den Grenzlinien, dem Wendekreis des Krebses auf der nördlichen Halbkugel und dem nördlichen Polarkreise liegt die nördliche gemäßigte, und zwischen dem südlichen Wendekreis des Steinbockes und dem südlichen Polarkreise liegt die südliche gemäßigte Zone. Von der Beleuchtung der Erde in einem bestimmten Zeitpunkte kann man sich jederzeit durch den bloßen Anblick überzeugen, wenn man einen Globus so in die Sonne stellt, dass seine Achse zur Erdachse parallel ist und der Ortsmeridian mit dem des Globus übereinstimmt. So findet man die Länge des Tages für alle Breiten auf der Erde, die Zeit des Auf- und Unterganges u. s. w.

Legen wir durch die Sonne H (Fig. 357) eine zum Erdäquator parallele Ebene F, so schneidet diese die Erdbahn im Frühlings- und Herbstpunkte V und A. Die Vectoren VH und AH geben die Richtung an, in der wir an diesen Bahnstellen die Sonne am Himmel erblicken. In der Sommer- und Winterstellung (Fig. 79, Seite 60) übt aber die Sonne auf die Massen der Erde in der Umgebung des Äquators eine Wirkung in dem Sinne aus, dass sie die Erdachse aufzustellen sucht. Infolge der Erdrotation tritt dann die Präcessionserscheinung auf, und daher beschreibt die Erdachse die Mantelfläche eines Kegels. Dasselbe gilt auch für die Gerade HP in Fig. 357, die auf der Ebene FF senkrecht steht. Jene Stellen am Himmel, die infolge der Präcession der Reihe nach Himmelspol werden, liegen auf einem Kreise, der in Fig 344 punktiert angegeben ist, und sein Mittelpunkt wird als „Mittelpunkt der Ekliptik" bezeichnet. Deshalb rücken auch die Durchschnittspunkte V und A im Laufe der Zeit nach V' und A', also im entgegengesetzten Sinne weiter, als die Erde ihre Bahn um die Sonne beschreibt. Wenn wir daher das Jahr als jene Zeit definiert haben, die von einem Zusammentreffen der Sonne mit dem Frühlingspunkte bis zum nächsten vergeht, so wird wegen der Präcession das Jahr kürzer ausfallen als wenn der Frühlingspunkt unveränderlich wäre. Man bezeichnet daher dieses durch die Präcession verkürzte Jahr als das tropische Jahr zum Unterschiede von dem siderischen Jahre, das von einer Coincidenz mit einem unveränderlichen Fixsterne bis zur nächsten dauert. Ersteres dauert 365·2422, letzteres 365·2564 Tage. Der Frühlingspunkt verschiebt sich auf der Ekliptik jährlich um 50 Bogensecunden, und braucht daher $(360 . 60 . 60) : 50 = 25900$ Jahre, um die ganze Peripherie zurückzulegen. Diesen Zeitraum von rund 26000 Jahren bezeichnet man als das platonische Jahr. Der Frühlingspunkt bewegt sich jedoch nicht mit gleichförmiger, sondern bald mit größerer, bald mit kleinerer Geschwindigkeit. Diese Beschleunigungen besitzen eine Periode von etwas über 18 Jahren und sind auf eine vom Monde ausgehende Nutationsbewegung zurückzuführen.

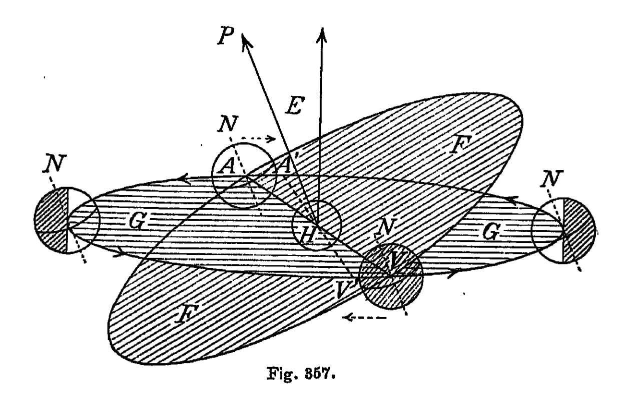


Fig. 357.

Der Mond.

Während die Sonne täglich kaum um einen Grad hinter den Fixsternen zurückbleibt, entfernt sich der Mond von einem gleichzeitig aufgehenden Fixsterne im Laufe eines Tages um fast 13°. Infolge dessen bleibt er schon in $360 : 13 = 27$ Tagen, genauer gemessen in $27^d\ 7^h\ 43'\ 11{\cdot}5''$ um einen vollen Winkel hinter demselben zurück. Man bezeichnet daher diese Zeit als einen siderischen Monat. Unter einem synodischen Monate versteht man dagegen die Zeit von einer Begegnung mit der Sonne bis zur nächsten, und diese beträgt $29^d\ 12^h\ 44'\ 3''$; denn während der Mond im Vergleiche zu einem bestimmten Fixsterne bereits um 360° zurückgeblieben ist, hat sich die Sonne von demselben bereits wieder um etwa 27° entfernt, und diesen Bogen legt der Mond erst in zwei weiteren Tagen zurück.

Wenn Sonne und Mond gleichzeitig den Meridian passieren, so sagt man, die beiden Gestirne befinden sich in „Conjunction". Bei dieser Stellung befindet sich offenbar der Mond zwischen Sonne und Erde und wendet daher der letzteren seine Schattenseite zu, wir haben somit Neumond. Würden die Mondbahn und die Erdbahn genau in dieselbe Ebene fallen, so würde bei jedem Neumonde eine Sonnenfinsternis eintreten, und der Mond würde um diese Zeit immer an derselben Stelle am Horizonte aufgehen wie die Sonne. Die beiden Bahnebenen schließen aber miteinander einen Winkel ein, der zwischen 5° und 5° 17·5' schwankt, weshalb der Mond der Sonne meistens bald nördlich, bald südlich ausweicht.

Passieren Sonne und Mond gleichzeitig gerade gegenüber liegende Meridiane, so sagt man, sie befinden sich in „Opposition". In diesem Falle befindet sich die Erde zwischen Sonne und Mond, und dieser wendet daher der Erde seine beleuchtete Hälfte zu, wir haben Vollmond. Während die Sonne bei der Winterstellung am südlichen Himmel einen zum Äquator parallelen Kreis beschreibt, bewegt sich der bei G links von E befindliche Mond, wie sich aus Fig. 356 ergibt, am nördlichen Himmel auf einer Bahn, welche die Sonne vor einem halben Jahre beschrieben hat, und weicht von derselben nur insoferne etwas ab, als die Lage der Mondbahn von der der Erdbahn etwas verschieden ist.

Im Sommer dagegen bewegt sich der Vollmond ungefähr auf derselben Bahn wie die Sonne im Winter. Schneiden sich die Ebene der Mondbahn und die Ekliptik in einer Geraden AB (Fig. 358), so bezeichnet man den Punkt B der Mondbahn als den „aufsteigenden", und A als den „absteigenden Knoten". Die Knotenpunkte verschieben sich auf der Ekliptik in der Richtung AA' und BB', und zwar so rasch, dass sie bereits in 18·6 Jahren einen vollen Winkel zurückgelegt haben. Wäre der Neigungswinkel beider Ebenen, also auch der Winkel zwischen ihren Vectoren $\eta = 0$, so würde bei jedem Neumonde eine Sonnenfinsternis,

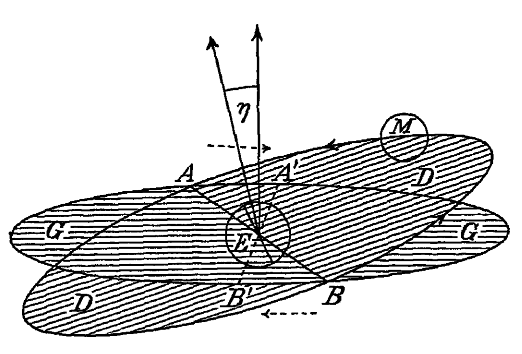


Fig. 358.

und bei jedem Vollmonde eine Mondesfinsternis eintreten. So aber treten Verfinsterungen nur dann ein, wenn sich der Neumond oder der Vollmond in der nächsten Nähe der Knotenpunkte befindet. Die Zeit, welche vergeht, bis der Mond ein zweites Mal denselben Knotenpunkt passiert, nennt man einen „Drachenmonat".

Da sich die Knotenpunkte im entgegengesetzten Sinne verschieben, wie die Sonne infolge ihrer scheinbaren Bewegung um die Erde, so begegnet der Mond viel früher einem Knotenpunkte als der Sonne, und deshalb ist der Drachenmonat etwas kürzer als der synodische Monat, er beträgt nämlich $27^d\ 5^h\ 5'\ 36''$. 242 Drachenmonate machen aber fast genau dieselbe Zeit aus, wie 223 synodische Monate; denn es sind:

$$27{\cdot}2122 . 242 = 29{\cdot}5306 . 223 = 6585 \text{ Tage} = 18 \text{ Jahre } 11 \text{ Tage.}$$

Wenn sich also einmal Sonne und Mond in einem der beiden Knotenpunkte getroffen haben, so werden sie sich nach 18 Jahren und 11 Tagen wieder hier treffen, und es wird also wieder eine Sonnen- oder Mondesfinsternis eintreten, wenn dies das erstemal der Fall war. Dieser unter dem Namen „Sarosperiode" bekannte Zeitraum war bereits den alten Chaldäern und auch den Chinesen schon 2000 v. Chr. bekannt.

Verwendet man zur Bestimmung der Länge des siderischen Monates den Meridian des Frühlingspunktes statt eines Fixsternes, so erhält man den tropischen Monat, der wegen der Präcession des Frühlingspunktes um $7''$ kürzer ist.

Die Sonnenfinsternisse können partial, total oder ringförmig sein. Im ersteren Falle drückt man den Grad der Verfinsterung in Zollen aus, indem man den scheinbaren Durchmesser der Sonne wie die alte Längeneinheit „ein Fuss" in zwölf Theile eintheilt. Die totalen Sonnenfinsternisse bieten günstige Gelegenheit zur Beobachtung der nächsten Umgebung der Sonne.

Die Mondesfinsternisse verschaffen uns dagegen die Gelegenheit, die kugelförmige Gestalt der Erde unmittelbar wahrzunehmen. Dabei zeigt der Erdschatten einen viel größeren Umfang, als man ihn aus astronomischen Gründen vermuthen möchte. Diese Erscheinung ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass schon in sehr hohen Luftschichten ein großer Theil der Lichtstrahlen durch Brechung von der geraden Richtung abgelenkt und von der Atmosphäre aufgenommen wird.

Die Conjunctions- und Oppositionsstellung bezeichnet man auch als die Syzygien. Der Verlauf der übrigen Phasen lässt die gegenseitige Bewegung der Erde und des Mondes deutlich erkennen. Die Form und Stellung der Mondessichel stimmt immer vollkommen mit der Beleuchtung einer von der Sonne bestrahlten Kugel überein, die wir in einiger Entfernung in der Richtung des Mondes erblicken. Daraus schließen wir, dass der Mond sein Licht nur von der Sonne empfängt. Wenn der Mond „abnimmt", so wendet er die convexe Seite nach Osten, da er in dieser Richtung täglich mehr zurückbleibt als die Sonne, und sich derselben nach dem Vollmonde von Westen her immer nähert. Beim „ersten Viertel" culminiert der Mond, wenn die Sonne untergeht, beim „letzten Viertel", wenn sie aufgeht. Ist mit dem Neumonde die Zeit der Conjunction vorüber, so entfernt er sich wieder von der Sonne in der Richtung nach Osten und kehrt daher die convexe Seite der Sichel nach Westen. Die letztere Stellung ist mithin für den „zunehmenden" Mond charakteristisch. (Fig. 359.) Wie uns die von Osten nach Westen fortschreitende Beleuchtung der Erde sagt, dass sich die-

selbe von Westen nach Osten dreht, so entnehmen wir auch dem Verlaufe der Mondesphasen, dass sich der Mond im gleichen Sinne um die Erde, wie diese um ihre eigene Achse dreht. Weil endlich die Sonne am Himmel gegenüber den Sternen im gleichen Sinne fortschreitet wie der Mond, so vollzieht sich auch die Bewegung der Erde um die Sonne im nämlichen Sinne, wie die des Mondes um die Erde, und diese um ihre eigene Achse.

Der Mond wendet der Erde immer dieselbe Halbkugel zu und führt um diese Mittellage nur schwache Seitenbewegungen aus, die man als „Libration“ bezeichnet. Hinsichtlich seiner Stellung zur Erde besitzt er also keine Bewegung um die eigene

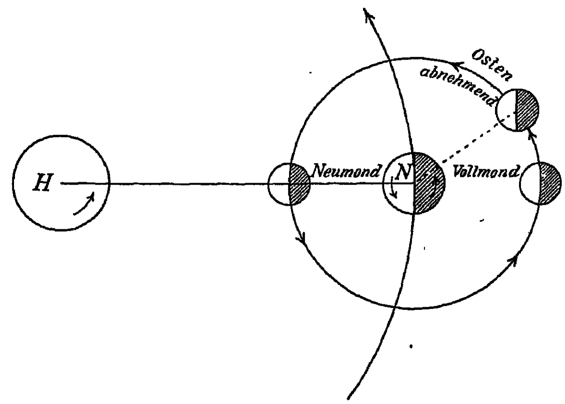


Fig. 359.

Achse. Die sorgfältigste Beobachtung seiner Oberfläche hat zum Resultate geführt, dass der Mond nicht wie die Erde von einer Atmosphäre umgeben ist. Eigenartiger Natur sind seine Gebirgsformationen, sowohl nach ihrer horizontalen, als auch nach ihrer verticalen Gliederung. Sie erreichen, wie sich aus Schattenbeobachtungen ergibt, 8800 m, also relativ viel größere Höhen als die Gebirge der Erde. Besonders auffallende Gebilde sind die fast geradlinigen, bis gegen 500 km langen Rillen und die unzähligen Ringgebirge von der verschiedensten Größe, die aber nicht den Typus vulcanischer Krater zeigen, sondern mehr an die Formationen einer plastischen Masse erinnern, die von einem Projectil getroffen wurde.

Die Planeten.

Das Werk „De revolutionibus“, in welchem Copernicus das heliocentrische Sonnensystem aufstellte, erschien im Jahre 1543. Die nächsten und wichtigsten Erfolge in der Ausbildung dieses Planetensystemes waren die beiden ersten Kepler'schen Gesetze, welche im Jahre 1609, und das dritte Gesetz, welches im Jahre 1618 veröffentlicht wurde. Die von Kepler herausgegebenen, dem Andenken Kaiser Rudolfs II. gewidmeten, „rudolfinischen Tafeln“ erschienen im Jahre 1627 zu Ulm und enthalten nur Angaben über die Bahnen der Planeten Mercur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn, die großentheils noch auf Grund der Beobachtungen des Tycho Brahe zusammengestellt sind. Im Jahre 1781 entdeckte der berühmte Astronom William Herschel mit Hilfe seines selbstverfertigten Spiegelteleskopes den Planeten Uranus und erkannte ihn als solchen, weil dieser Stern bei zunehmender Vergrößerung des Fernrohres auch einen immer größeren Durchmesser zeigte, während gleichzeitig seine Helligkeit abnahm. Die Auffindung des äußersten Planeten, Neptun, war einer der glänzendsten Erfolge der astronomischen Messtechnik und Berechnung, indem der Engländer Adams und der Franzose Leverrier im Jahre 1846 vorausbestimmten, wann und wo der neue Planet zu sehen sei, dessen Existenz schon seit geraumer Zeit aus den Störungen der übrigen Planetenbewegungen erkannt worden war. Das früher so mühevolle Aufsuchen neuer Planeten und Planetoiden ist in jüngster Zeit durch die photographischen Aufnahmen des Fixsternhimmels wesentlich erleichtert worden. Wenn man nämlich das Gesichtsfeld des beweglichen Äquatorials photographiert, so erscheinen alle Fixsterne je nach ihrer Helligkeit als mehr oder weniger große Punkte, während die noch mit anderen

Bewegungen ausgestatteten Planeten bei längerer Exposition als Linien abgebildet werden, aus denen sich gleichzeitig schon die Richtung und Geschwindigkeit der Planetenbewegung entnehmen lässt.

Die folgende Tabelle enthält die wichtigsten Angaben über die Planeten und den Planetoiden Juno.

Planet	Mittlere tägliche Bewegung in Bogensecunden	Halbe große Achse in Sonnenweiten	Sider. Umlaufszeit in Tagen	Astronomische Excentricität
Mercur ☿	14732″ = 4° 5′ 32″	0·3871	88	0·206
Venus ♀	5767″ = 1° 36′ 7″	0·7233	224·7	0·007
Erde ♁	3548″ = 59′ 8″	1·0000	365·2564	0·017
Mars ♂	1886″ = 31′ 26″	1·5237	687 = 1 Jahr 22 Tage	0·093
Juno* ⚵	814″ = 13′ 34″	2·6683	1592 = 4 „ 132 „	0·258
Jupiter ♃	299″ = 4′ 59″	5·2028	4333 = 11 „ 314 „	0·048
Saturn ♄	120″ = 2′	9·5389	10759 = 29 „ 167 „	0·056
Uranus ⛢	42″	19·192	30689 = 84 „ 48 „	0·046
Neptun ♆	21″	30·055	60181 = 164 „ 280 „	0·0085

In dem relativ großen Zwischenraume zwischen Mars und Jupiter befinden sich über 430 Himmelskörper, die sogenannten Planetoiden, die ebenfalls eine den Kepler'schen Gesetzen entsprechende Bewegung um die Sonne ausführen, aber im Vergleiche zu den Planeten eine viel geringere Masse besitzen.

Alle Planeten bewegen sich in Bahnen, die mit der Erdbahn einen Winkel von höchstens 7° einschließen — nur einzelne Planetoiden weichen noch mehr davon ab. Sie sind daher insgesammt in der nächsten Umgebung der von der Sonne am Himmel beschriebenen Bahn zu finden. Hinsichtlich ihrer Bewegung im Vergleiche zu den Fixsternen weichen sie manch-

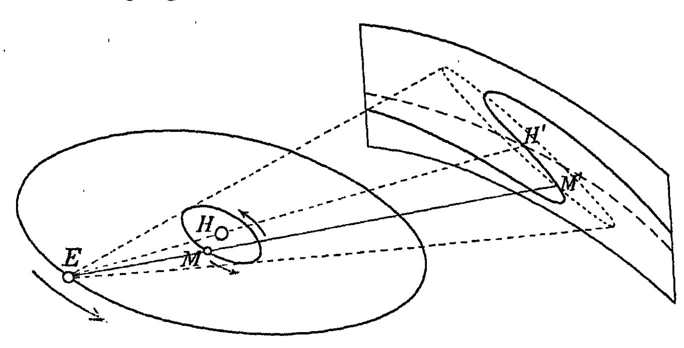


Fig. 360.

mal wie Sonne und Mond in der Richtung nach Osten zurück, in diesem Falle sagt man, sie bewegen sich „rechtläufig“, manchmal eilen sie aber auch den Fixsternen voraus, und dann nennt man sie „rückläufig“. Diese Bewegungsform suchten sich die Astronomen zur Zeit des ptolemäischen Sonnensystems durch die Epicyklentheorie zu erklären. Man erhält nämlich ähnliche Linien, wie sie die Planeten am Fixsternhimmel beschreiben, wenn sich der Mittelpunkt eines Kreises auf einer geraden Linie fortbewegt, während der Planet den Umfang des Kreises mit gleichförmiger Geschwindigkeit zurücklegt; der Mittelpunkt des Kreises führt die deferierende oder fortschreitende, der Planet auf der Peripherie des Kreises die epi-

cyklische Bewegung aus. Diese Bahnformen lassen sich beim copernicanischen Sonnensysteme folgendermaßen leicht erklären. Ein innerer Planet z. B. der Mercur M (Fig. 360) bewegt sich mit viel größerer Geschwindigkeit um die Sonne H als die Erde E und entfernt sich daher von der Sonne nie um einen größeren Winkel als die von der Erde an die Planetenbahn gezogene Tangente von der Richtung nach der Sonne abweicht. Die Projection der Sonne auf den Hintergrund des mit Fixsternen besäeten Weltraumes beschreibt die deferierende Bewegung; diese ist also eine Folge der Bewegung der Erde um die Sonne. Der die Sonne umkreisende Merkur führt auf den Fixsternhimmel projiciert die epicyklische Bewegung aus, die jedesmal rückläufig wird, wenn sich der Mercur zwischen Sonne und Erde befindet. Der größte Abstand zwischen Sonne und Mercur beträgt 29⁰, zwischen Sonne und Venus 48⁰. Diese beiden Planeten erscheinen uns mithin als Morgen- oder Abendstern, je nachdem sie eine „westliche oder östliche Elongation" besitzen und daher kurz vor der Sonne auf oder bald nach ihr untergehen.

Anders kommt die scheinbare Bewegung der äußeren Planeten zustande. Während die Erde auf ihrer Bahn einen vollen Umlauf ausführt, schreitet z. B. der Uranus U (Fig. 361) auf seiner Bahn nur um etwa 4⁰

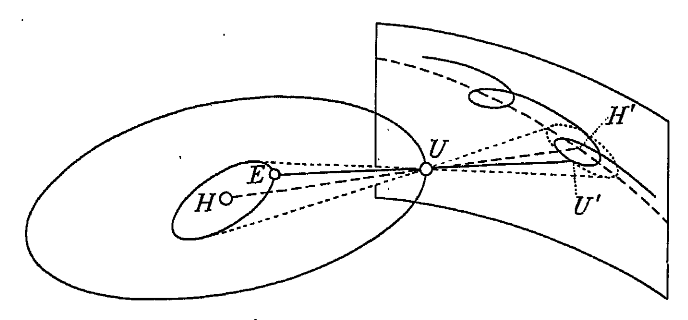


Fig. 361.

weiter. Hier erhalten wir den Mittelpunkt H' der deferierenden Bewegung, wenn wir den Uranus von der Sonne aus auf den Fixsternhimmel projicieren und die epicyklische Bewegung durch die Projection U' des Planeten U aus den verschiedenen Punkten der Erdbahn. So oft also der Uranus um 4⁰ weiterschreitet, beschreibt der Punkt U' jedesmal eine Schlinge. Bei den äußeren Planeten ist daher die deferierende Bewegung eine Folge der Bewegung dieses Planeten, die epicyklische stammt dagegen von der Bewegung der Erde um die Sonne.

Die meisten Planeten werden von Trabanten, Satelliten, Nebenplaneten oder Monden umkreist. Die Erde hat deren einen, der Mars zwei, der Jupiter vier, der Saturn nebst einem schleierartigen Ringe deren acht, Uranus vier und Neptun einen. Die Existenz von Monden ist besonders darum von Wichtigkeit, weil sich aus deren Umlaufsgeschwindigkeit die Masse des Planeten und aus dessen Größe auch die Dichte bestimmen und mit jener der Erde vergleichen lässt. Bedeutet M die Masse des Planeten, m die des Mondes, r seine Entfernung und k eine Zahl, mit der wir den Ausdruck $\frac{Mm}{r^2}$ multiplicieren müssen, um die Anziehungskraft in Dyn zu erhalten, so ist in dieser Einheit ausgedrückt $f = \left(k \frac{M}{r^2}\right) m$ die Kraft und $k \frac{M}{r^2}$ die Be-

schleunigung, welche die Masse des Mondes durch die Masse des Planeten erfährt. Bei der Umlaufszeit T bewirkt aber die Fliehkraft eine Beschleunigung $b = \frac{4\pi^2 r}{T^2}$, und daher ist $\frac{4\pi^2 r}{T^2} = k \frac{M}{r^2}$, also $M = \frac{4\pi^2 r^3}{k . T^2}$. Wenn wir demnach k für einen einzigen Planeten berechnen, so können wir M auch für die übrigen Planeten aus ihrer mittleren Entfernung r und aus der Umlaufszeit T eines Trabanten bestimmen. Das Verhältnis der Massen zweier Planeten ergibt sich aus der Proportion $M_1 : M_2 = \frac{r_1^3}{T_1^2} : \frac{r_2^3}{T_2^2}$, wenn r_1 und T_1 die Entfernung und Umlaufszeit eines Trabanten beim ersten und r_2 und T_2 diese Werte für einen Trabanten des zweiten Planeten bedeuten. Mit Hilfe dieser Formel können wir nicht nur die Massenverhältnisse untereinander, sondern auch das Verhältnis zur Masse der Sonne bestimmen. Auf letztere bezogen, ist die Masse der Erde $\frac{1}{331000}$, des Mars $\frac{1}{3100000}$, Jupiter $\frac{1}{1050}$, Saturn $\frac{1}{3500}$, Uranus $\frac{1}{22600}$ und des Neptun $\frac{1}{13800}$. Die Masse der Erde gleich 1 gesetzt, würden sich der Reihe nach die Maßzahlen ergeben: für die Sonne 331000, für Mercur 0·04, für Venus 0·8, Erde 1, Mars 0·1, Jupiter 316, Saturn 95, Uranus 14·6 und Neptun 17·6. Allerdings wird nicht nur der Mond vom Planeten, sondern auch dieser vom Monde angezogen und die Sonne erfährt auch wieder einen Zug von allen Planeten, der aber nicht merklich zur Geltung kommt. Diese gegenseitige Anziehung zeigt sich, wenn zwei Planeten, welche sich in ihren Bahnen näher kommen, aus ihrer Bahn etwas abgelenkt, in ihr beschleunigt oder verzögert werden. Derartige Verschiebungen der Planeten bezeichnet man als „Störungen“ oder „Perturbationen“. Ein Planet erfährt natürlich eine umso stärkere Störung, je größer die Masse und je geringer die Entfernung des störenden Himmelskörpers ist. Aus derartigen Störungen, die z. B. ein Komet zuerst durch die Erde und dann durch Venus erfährt, lässt sich auch die Masse der letzteren beurtheilen, die wir sonst nicht ermitteln können.

Da wir aus der Entfernung der Himmelskörper und ihrer scheinbaren Größe auch ihre wirkliche Größe berechnen können, so lässt sich ihre Dichte mit der der Erde vergleichen, die ungefähr 5·6 beträgt, und wir erhalten so für die Sonne 1·3, für Mercur 6·6, Venus 4·5, Mars 4·0, Jupiter 1·36, Saturn 0·72, Uranus 1·3 und Neptun 1·7.

Schon Kepler hat das ganze Planetensystem als ein einheitliches Ganzes aufzufassen gesucht, und das Resultat derartiger Forschungen war eben das dritte Kepler'sche Gesetz. Newton hat durch die Aufstellung des Gravitationsbegriffes für diese Auffassung die physikalische Grundlage geschaffen. Einen noch weiter gehenden Schluss zogen daraus Kant im Jahre 1755 und Laplace im Jahre 1796, indem sie die Vermuthung aussprachen, dass das ganze Planetensystem gemeinsamen Ursprunges sei. Nach dieser sogenannten „Kant-Laplace'schen Theorie“ entwickelten sich die Sonne und alle Planeten aus einer kosmischen Nebelmasse, die sich um eine Achse drehte und zugleich immer mehr zusammenzog. Dabei concentrierten sich die Massen um einzelne Punkte im stärkeren Grade und führten so zur Ausscheidung der Planetenkörper im feurigflüssigen Zustande. Dafür spricht nach Kant nicht nur der feurigflüssige Zustand der Sonnenoberfläche und ein ähnlicher Zustand des Erdinnern, sondern auch der gemeinsame Drehungssinn aller Planetenumläufe und Mondbewegungen, und endlich der Drehungssinn der Planeten selbst, besonders aber der Saturnring. Außerdem zeigen einzelne Nebelgebilde im Bereiche der Fixsterne ganz ähnliche Massenvertheilungen, wie sie in früheren Stadien der Entwicklung unseres Sonnensystemes auftreten mussten.

Kometen und Meteore.

Die Kometen oder Haarsterne, die zeitweilig in unserem Sonnensysteme auftauchen, bewegen sich entweder in stark elliptischen oder parabolischen Bahnen um die Sonne, welche den Brennpunkt derselben bildet. Die meisten erscheinen so klein, dass man sie nur mit guten Fernrohren wahrnehmen kann, andere zeichnen sich wieder durch die Größe und Pracht ihrer Erscheinung, sowie auch durch die Veränderlichkeit ihrer Gestalt aus. Der Komet vom Jahre 1846 umspannte mit seinem Schweif mehr als 60 Bogengrade. Da die Kometen auf Planeten, in deren Nähe sie kommen, fast gar keinen störenden Einfluss auszuüben vermögen, so muss ihre Masse sehr gering sein.

Die Meteore oder Sternschnuppen sind meist nur für einige Augenblicke sichtbar, während sie am Himmel einen Bogen von einigen Graden beschreiben. Sie treten entweder einzeln oder in größeren Gruppen einen oder mehrere Tage hindurch auf. Wenn nämlich die kosmischen Massen, die den Raum des Sonnensystemes erfüllen, auf ihren Bahnen der Erde so nahe kommen, dass sie von dieser angezogen werden, so nehmen sie in der unmittelbaren Nähe der Erde ungeheuere Fallgeschwindigkeiten an und werden bereits in den obersten Luftschichten bis zur Glühhitze erwärmt. Sie erreichen Geschwindigkeiten bis zu 50 (km sec^{-1}) und werden meistens schon in einer Höhe von etwa 80 km durch die Hitze vollständig aufgerieben. Nur relativ wenige gelangen bis auf den Erdboden.

Durch besondere Stärke zeichneten sich die Sternschnuppenfälle am 27. November 1872 und am 27. November 1885 aus. Es liegt daher die Vermuthung nahe, dass sich der Biela'sche Komet, welcher in den Jahren 1772, 1806, 1826, 1832 und 1845 erschien und sich zuletzt in zwei Theile spaltete, in solche Meteorschwärme aufgelöst habe, denn in den Jahren 1859, 1865, 1872 und 1885, in welchen er wieder hätte erscheinen sollen, blieb er aus, während an seiner Stelle im drittletzten und letztgenannten Jahre ein starker Meteorschwarm erschien. Für die Bewegungsrichtung desselben ist der sogenannte Radiationspunkt von Wichtigkeit, also jene Stelle am Himmel, welche die Richtung angibt, aus der sich die Meteore der Erde nähern.

Die Fixsterne.

Weitaus der größte Theil der Sterne, die dem freien Auge und in den Teleskopen sichtbar sind, nehmen nur an der scheinbaren Bewegung des Himmels Antheil, welche auf die Drehung der Erde um ihre eigene Achse zurückzuführen ist. Ihre gegenseitigen Entfernungen bleiben jahraus jahrein fast unveränderlich. Während jedoch die Planeten in stark vergrößernden Fernrohren als kreisförmige Scheiben erscheinen, behalten auch die hellsten Fixsterne immer ihr punktartiges Aussehen bei und werden in photographischen Aufnahmen nur deshalb größer abgebildet, weil sich die Wirkung ihrer intensiveren Strahlung auf der photographischen Platte mehr ausbreitet. Schon der Umstand, dass bei diesen Sternen trotz starker Vergrößerung kein messbarer Durchmesser zum Vorschein kommt, deutet auf eine sehr große Entfernung hin. Haben wir zur Messung der Mondentfernung den Erdradius als Standlinie benützt, so müssen wir, um die Distanz eines Fixsternes zu bestimmen, den Durchmesser der ganzen Erdbahn verwenden. Den Winkel, den die von ihren Endpunkten zum Sterne gezogenen Strahlen miteinander einschließen, nennt man die jährliche Parallaxe. Obwohl damit die Standlinie 23400mal länger geworden ist,

verbleiben dennoch alle derartigen Parallaxenwerte unter 1″. Für den Stern „α Centauri“ beträgt die jährliche Parallaxe 0·71″; um eine Strecke unter diesem Gesichtswinkel zu sehen, müssen wir 300000 mal so weit von ihr entfernt sein, als ihre Länge beträgt. Da das Licht in runden Zahlen schon 500 Sec. braucht, um von der 150000000 km $= \frac{3}{2} . 10^{13}$ cm entfernten Sonne zu uns zu gelangen, so vergehen noch 300000 mal mehr Sec., bis das Licht von jenem Sterne bei uns anlangt; das Jahr hat aber $3·156 . 10^7$ Sec. und daher braucht das Licht $15 . 10^7 : 3·156 . 10^7 = 4·6$ Jahre, um eine solche Strecke zurückzulegen. Man sagt daher, der Stern „α Centauri“ ist 4·6 Lichtjahre von uns entfernt. Der Stern „Capella“ (α im Fuhrmann) hat eine jährliche Parallaxe von 0·39″ und besitzt daher eine Entfernung von 8·3 Lichtjahren. Der Parallaxe von 0·16″ bei der „Wega“ entspricht ein Abstand von 20 Lichtjahren u. s. w. Da endlich bei den meisten Sternen überhaupt keine Parallaxe mehr nachweisbar ist, so müssen sich dieselben in geradezu unermesslichen Entfernungen befinden.

Trotz dieser ungeheueren Entfernungen lassen sich auch noch bei solchen Sternen fortschreitende Bewegungen nachweisen. Bei vielen Sternen, deren Stellung schon vor langer Zeit genau bestimmt worden ist, treffen die Ortsbestimmungen aus diesem Grunde nicht mehr zu. Bei mehr als 10000 Sternen haben genauere Beobachtungen ergeben, dass dieselben „Doppelsterne“ sind, d. h. dass dieselben aus zwei Himmelskörpern bestehen, die sich um den gemeinsamen Massenmittelpunkt herumbewegen. Dies trifft z. B. auch beim hell leuchtenden „Sirius“ zu, der sich in je 46 Jahren mit einem viel lichtschwächeren Stern um dasselbe Gravitationscentrum bewegt. Die Geschwindigkeit der progressiven Bewegung mancher Himmelskörper lässt sich mit Hilfe der Spectralanalyse nachweisen, wenn man auf die Schwingungszahlen das Doppler'sche Princip anwendet. Wir haben in der Akustik darauf hingewiesen, dass die Höhe eines Tones abzunehmen scheint, wenn die Entfernung der Schallquelle rasch zunimmt, und dass sie scheinbar steigt, wenn sich der Tonerreger nähert. Dementsprechend werden auch die dunklen Linien im Spectrum eines sich entfernenden Sternes gegen das rothe, andernfalls gegen das violette Ende des Spectrums verschoben. Dabei verhält sich die scheinbare Schwingungszahl zur wirklichen, wie die um die Bewegungsgeschwindigkeit vermehrte oder verminderte Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellenbewegung zur unveränderten.

Nebst den ziemlich unregelmäßig vertheilten größeren Fixsterngruppen bemerken wir am Himmel ein Gebiet, das viel dichter mit Sternen besäet ist, nämlich die sogenannte „Milchstraße“, die wie ein bald breiterer, bald schmälerer, in sich zurückkehrender Strom den Himmel umzieht und in der Nähe des Sternbildes des Schwanes eine Gabelung besitzt. Die Helligkeitsvertheilung in derselben ist eine so unregelmäßige, dass es sehr schwer ist, sich daraus ein Bild über die muthmaßliche Massenvertheilung zu verschaffen. Teleskopisch vergrößert zeigen sich die helleren Stellen dichter mit Sternen besetzt, als die übrigen Gebiete. Der berühmte Astronom Herschel hat mittels seines großen Teleskopes an einer solchen Stelle von der Größe der Sonnenscheibe gegen 5000 Sterne gezählt.

Einen ganz anderen Charakter zeigen manche der am Himmel sichtbaren Nebelflecken. Während sich einige derselben bei starker Vergrößerung in Sternhaufen auflösen und ein von dunklen Linien durchzogenes Absorptionsspectrum besitzen, haben andere ein ähnliches Spectrum wie die Gase. Beide erwecken besonders darum unser Interesse, weil sie Massenvertheilungen darstellen, wie sie nach der Kant-Laplace'schen Theorie bei der Entwicklung unseres Sonnensystems vorausgesetzt werden. So finden wir im Sternbilde des „Pegasus“ eine kugelförmige Anhäufung ausgebildeter Sterne, während der Ringnebel in der „Leier“ eine elliptisch geformte Gruppierung aufweist. Relativ häufig sind endlich die Nebelgebilde mit spiraliger Massenvertheilung. Besonders schön entwickelt ist der Spiralnebel im nördlichen „Jagdhund“, und der im Sternbild der „Andromeda“. Zu derartigen Massengebilden gelangen wir thatsächlich, wenn wir uns vorstellen, wie der strahlenförmige Sector einer Kugel deformiert wird, falls sich die Massen im Innern der Kugel nach dem dritten Kepler'schen Gesetze zu drehen beginnen. Nehmen wir an, die Planeten befänden sich einmal auf einem von der

Sonne ausgehenden Strahle HX(Fig. 362) und setzen gleichzeitig ihre diesem Gesetze entsprechenden Bewegungen fort. Warten wir dann ab, bis der Mercur gerade zwei volle Umläufe zurückgelegt hat, so beträgt der inzwischen von der Venus zurückgelegte Bogen etwa 282°, die Bahn der Erde 173°, die des Mars 92°, die des Planetoiden Juno 40°, die des Jupiter 14·6° und die des Saturn 5·9°. Stellen also die Planeten einzelne Punkte einer strahlenförmig ausgestreckten Nebelmasse vor, so wird dieselbe infolge dieser Bewegung eine spiralige Form annehmen. Wir können also die Spiralnebel als kosmische Massen auffassen, die sich nach dem dritten Kepler'schen Gesetze

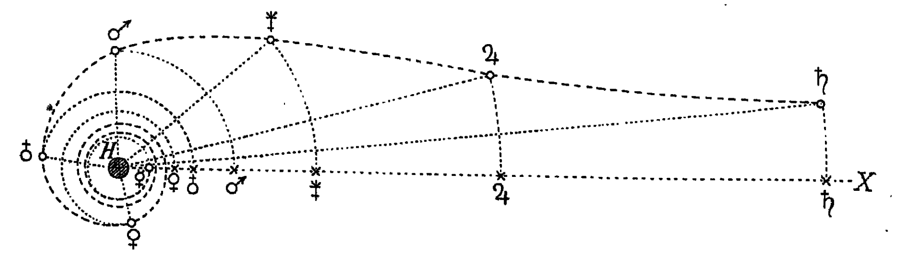


Fig. 362.

bewegen, wie die Massen unseres Sonnensystems. Auch das wiederholt beobachtete Aufleuchten neuer Sterne, wie z. B. des am 21. Februar 1901 aufgetauchten Sternes im Sternbilde des Perseus „Nova Persei" lässt den Schluss zu, dass in den verschiedensten Theilen des Weltraumes noch immer Veränderungen vorkommen, die mit gewaltigen Licht- und Wärmeentwicklungen verbunden sein dürften.

Das Scintillieren oder Funkeln der Sterne ist eine Wirkung der athmosphärischen Luft auf die von den Sternen kommenden Lichtstrahlen, und hängt auch stark vom Feuchtigkeitsgehalt der Luft ab. Wie die von einer Flamme aufsteigende Säule erwärmter Luft die dahinter befindlichen Gegenstände in zitternder Bewegung erscheinen lässt, so werden auch die Strahlen der Sterne umsomehr und öfter von ihrer Richtung abgelenkt, je unruhiger die Luft ist. So oft dabei ein größerer Theil der Wellenfläche in das Auge eindringt, scheint uns der Stern heller aufzuleuchten. Diese Erscheinung gehört daher in das Gebiet der „meteorologischen Optik".

Die Sonne.

Die physikalische Beschaffenheit der Sonne war schon seit langer Zeit Gegenstand eifriger Beobachtungen, die aber erst dann zu befriedigenden Resultaten führten, als die Spectralanalyse und die Photographie zur Untersuchung ihrer Strahlen verwendet wurden.

Die „granulierte" Formation ihrer leuchtenden Oberfläche deutet ohne Zweifel auf eine sehr heftige Bewegung der gasförmigen und flüssigen Massen hin, welche die oberste Schichte des Sonnenkörpers bedecken. Noch auffallender kommt diese Bewegung bei den Sonnenflecken und -Fackeln besonders am scheinbaren Rande der Sonne zum Vorschein. Erstere kann man auch ohne eine Vergrößerung wahrnehmen, wenn man die Sonne durch ein so dunkles Glas betrachtet, dass man ihr Licht leicht zu ertragen vermag. Sie besitzen eine sehr veränderliche Gestalt und bewegen sich im Sinne der Planetenbewegung um die Sonne herum. Daraus ergibt sich, dass sich die Sonne in etwa 25 Tagen einmal um ihre Achse dreht. Die Umdrehungsgeschwindigkeit ist aber nicht in allen Breiten der Sonne gleich groß, ein Umstand, der auch auf den flüssigen Zustand ihrer Oberfläche hinweist. Die Neigung des Sonnenäquators gegen die Erdbahn beträgt ungefähr 7°. In der Zu- und Abnahme der Sonnenflecken lässt sich deutlich eine elfjährige Periode erkennen. Die Intensität der Massenbewegung in vertikaler Richtung wird besonders während einer totalen

Sonnenfinsternis deutlich sichtbar. Bei solchen Gelegenheiten konnte man beobachten, wie die feuerflüssigen Massen bis zur Höhe von $^2/_3$ des Sonnenradius emporgeschleudert wurden und wie die ganze Umgebung solcher Stellen bis zu 30 Bogengraden in sehr lebhafter Bewegung begriffen war. Die Kürze der Zeit, in der diese sogenannten Protuberanzen auftauchen und wieder verschwinden, beweist, dass die Massen auf der Sonnenoberfläche nicht nur eine große thermische, sondern auch eine gewaltige kinetische Energie besitzen.

Die Leuchtkraft der Sonne ist so groß, dass die von ihr erzeugte Helligkeit auf der Erdoberfläche noch gegen 300000 Meterkerzen erreicht während die Helligkeit beim Vollmond kaum $^1/_2$ Meterkerze beträgt. Au der Stärke der Strahlung der Sonne suchte man einen Schluss zu ziehei wie hoch die Temperatur der leuchtenden Sonnenfläche sein müsse, und ge langte so zum Resultate, dass dieselbe gegen 7000° C betragen dürfte. Di hauptsächlich von glühenden Gasen, besonders von Wasserstoff gebildete leuchtende Hülle nennt man Chromosphäre.

Die Sonne ist zugleich der Mittelpunkt einer anderen Lichterscheinung, die besonders oft in den Tropengegenden kurz vor Sonnenaufgang und bald nach Sonnenuntergang sichtbar und als Zodiacallicht bezeichnet wird; seine Gestalt ist die eines mit der abgerundeten Spitze nach oben gerichteten Dreieckes mit einem ähnlich geformten helleren Kern. Es erstreckt sich von der Sonne weg bis in eine Entfernung von 70°—80° und besitzt ein schwachleuchtendes continuierliches Spectrum. Die Erscheinung macht den Eindruck, als sei die Sonne von einer Lichthülle umgeben, welche die Form eines flachgedrückten Ellipsoides hat und bis über die Venusbahn hinausreicht. Um die Erforschung der physikalischen Natur der Sonne hat sich besonders P. Angelo Secchi zu Rom große Verdienste erworben und die Erfolge seiner Arbeiten in seinem bekannten Werke „Die Sonne" zusammengestellt.

Die Sternwarten.

Die wissenschaftlichen Pflegestätten der Astronomie sind die Sternwarten. Die Kenntnis der Mondbewegungen bei den alten Chaldäern und Chinesen setzt nicht nur eine langjährige und regelmäßige Beobachtung, sondern auch eine sorgfältige Messung und Notierung derselben voraus. Eine der ältesten Sternwarten dürfte die des Kalifen Al Mamun (813—833 n. Chr.) zu Bagdad gewesen sein. In Deutschland errichtete zuerst ein Schüler des Regiomontanus namens Walther zu Nürnberg eine Sternwarte. Friedrich II. von Dänemark ließ im Jahre 1576 auf der Insel Hveen im Sund für Tycho Brahe die Warte Uranienburg einrichten. Auf Anregung Picards gründete König Ludwig IV. von Frankreich im Jahre 1667 die Sternwarte von Paris, welche besonders durch die Entdeckungen der Astronomen aus dem Geschlechte der Cassini und durch die Vorausberechnung der Neptunbahn durch Leverrier berühmt wurde. König Karl II. von England stiftete im Jahre 1675 im königlichen Garten zu Greenwich eine der berühmtesten Sternwarten, an welcher eine Reihe der hervorragendsten Astronomen wie Halley, Bradley, Airy u. a. thätig waren. Durch die Menge der von hier ausgegangenen Forschungen und Anregungen kam es, dass diese Sternwarte fast allgemein zum Ausgangspunkt der Längenmessungen benützt wird. Die Berliner Sternwarte stammt aus dem Jahre 1706, die von Petersburg (später Pulkowa) aus dem Jahre 1725, und die ältere Wiener Sternwarte wurde im Jahre 1755 errichtet. Außerdem sind noch von Bedeutung die Sternwarte am Cap der guten Hoffnung wegen ihrer südlichen Lage, wegen der astrophysischen und meteorologischen Beobachtungen Secchis die Sternwarte am Vatikan; besonders günstig gelegen ist die auf dem fast 1480 m hohen Mount Hamilton in Kalifornien im Jahre 1874 gegründete Lick-Sternwarte, ferner verdienen noch hervorgehoben zu werden die Sternwarten von Straßburg, Königsberg und Nizza. Die wichtigsten Einrichtungsgegenstände einer Sternwarte sind das Passageinstrument, ein in der Meridianebene drehbares Fernrohr, welches dazu

dient, den Culminationspunkt der Sterne genau zu beobachten, dann das Äquatorial, ein möglich stark vergrößerndes Fernrohr, das durch ein Uhrwerk um eine nach dem Weltpol gerichtete Achse so gedreht wird, dass sich das Gesichtsfeld während der Beobachtung nicht ändert, und endlich die fortwährend genau controlierte Normaluhr, welche die mittlere Sonnenzeit angibt, auf die alle Zeitbestimmungen zurückgeführt werden. Die früher vielfach auf den Sternwarten gemachten astrophysischen und meteorologischen Beobachtungen werden jetzt durchwegs von denselben getrennt auf eigenen Observatorien vorgenommen und wissenschaftlich verarbeitet.

Geophysik.

Gestalt und Größe der Erde. Schon im 6. Jahrhunderte v. Chr. vertrat die Pythagoräische Schule die Ansicht, dass die Erde die Gestalt einer Kugel haben müsse. Für diese Ansicht trat in der zweiten Hälfte des 4. Jahrhundertes v. Chr. auch Aristoteles ein und berief sich dabei auf die Beobachtung, dass der Schatten der Erde bei den Mondesfinsternissen kreisförmig begrenzt erscheine. Der in Alexandria lebende Athener Erathosthenes führte um das Jahr 200 v. Chr. bereits eine Gradmessung aus, um den Umfang der Erde zu bestimmen, und fehlte dabei um weniger als $^1/_6$ der Gesammtlänge. Die Vorstellung von der kugelförmigen Gestalt der Erde war also schon viel früher vorhanden, ehe die Portugiesen unter dem kühnsten aller Seefahrer Fernão Magalhães und Sebastian Elcano im Jahre 1521 durch die erste Weltumsegelung hiefür den unmittelbaren Beweis erbrachten.

Diese Vermuthung legt uns auch der Anblick des Mondes nahe, dessen genauere Betrachtung besonders bei den verschiedenen Phasen auf uns sofort den Eindruck macht, dass er eine kugelförmige Gestalt habe. Einen viel näherliegenden Grund führt Plinius im ersten Jahrhunderte n. Chr. an, indem er auf die Erscheinung hinweist, dass ein vom Ufer sich entfernendes Schiff sich dem Horizonte immer mehr nähert und schließlich nicht wegen der allzugroßen Entfernung unsichtbar wird, sondern schon früher den Gesichtskreis überschreitet. Im Jahre 1525 nahm der französische Arzt Jean Fernel eine Gradmessung in der Weise vor, dass er die Entfernung zweier Orte, deren geographischer Breitenunterschied astronomisch bestimmt worden war, nicht mit der Messleine, sondern dadurch abmaß, dass er mit einem Wagen die nahezu geradlinige Verbindungsstraße zurücklegte und die Umläufe eines Rades zählte, dessen Umfang ihm bekannt war. Er erzielte so eine bis dahin noch nie erreichte Genauigkeit. Es blieb aber dem erfinderischen Snellius vorbehalten, um das Jahr 1617 eine noch verlässlichere Vermessungsart zu ersinnen, nämlich die „Triangulierungsmethode". Zu diesem Zwecke wurde eine vollkommen geradlinige Strecke ihrer Länge nach genau gemessen, und als Standlinie zur Berechnung eines Dreieckes benützt, dessen Seiten wieder als genau bekannte Standlinien verwendet werden konnten. So wurde ein Dreieck an das andere angeschlossen, bis man schließlich mit großer Genauigkeit die Entfernung zweier unter demselben Meridian liegenden Orte feststellen konnte. Eine sehr sorgfältige Messung nach dieser Methode führte Picard im Jahre 1670 aus, wobei bereits zu den Winkelmessungen statt der Visierlineale Fernrohre mit Fadenkreuz benützt wurden. In Deutschland fanden sehr genaue Vermessungen unter Bessel (1824) und Bäyer statt, und auf Vorschlag des letzteren traten im Jahre 1862 preußische, österreichische und sächsische Commissäre zusammen, um eine „mitteleuropäische" Gradmessung zu veranstalten, die bereits im Jahre 1867 in eine „europäische" übergieng. Mit den Meridianbestimmungen wurden später auch Messungen der geographischen Länge und genaue Nivellierungen verbunden; ebenso wurden exact ausgeführte Gravitationsbestimmungen in den Bereich der Beobachtungen gezogen.

Picard hatte bereits vermuthet, dass die Gradlängen des Meridians in verschiedenen Breiten andere Werte annehmen, und schließlich stellte sich heraus, dass die Krümmung gegen den Äquator hin zunehme und dieser einen Halbmesser von 6377·4 km habe, aber die halbe Poldistanz 6356·1 km, also 21·3 km weniger betrage. Das Verhältnis $21{\cdot}3 : 6377{\cdot}4 = 1 : 299$ bezeichnet man als die Abplattung. Aber nicht nur die von einander abweichenden Werte, welche verschiedene Längen- und Breitengrade ergaben, sondern auch die Unregelmäßigkeiten der Gravitationsconstanten zwingen uns zur Annahme, dass die Erde nur angenähert als ein an den Polen abgeplattetes Rotationsellipsoid angesehen werden kann, das überdies viel-

leicht nicht einmal eine vollkommen unveränderliche Gestalt hat, wie verschiedene Bodensenkungen und die mit den Erdbeben verbundenen Bewegungen beweisen.

Die Mittagslinie findet man auf folgendem Wege. Man zieht um den Fußpunkt eines verticalen Stabes einen Kreis, dessen Halbmesser gleich ist dem Abstande der Schattenspitze vom Fußpunkte des Stabes. Die Richtungslinie des Schattens ist dann von der Mittagslinie ebensoweit entfernt wie die Schattenlinie nach Mittag, wenn die Schattenspitze wieder jenen Kreis erreicht. Diese Construction führt aber nur in dem Falle zu einem annähernd genauen Resultat, wenn an jenem Tage die Zeitgleichung, also die Differenz zwischen der wahren und mittleren Sonnenzeit gleich Null ist. Viel genauer lässt sich die Meridianrichtung durch die Beobachtung der Fixsterne, am einfachsten, wenn auch nur angenähert durch Beobachtung des Polarsternes ermitteln, indem man die Visierrichtung auf die horizontale Ebene projiciert und auf einer entfernteren Wand eine Marke anbringt, welche die Nord-Südrichtung angibt.

Die geographische Breite (Fig. 363) findet man durch Messung der Polhöhe HBP, da dieser Winkel gleich groß ist, wie $AEB = \varphi$.

Als Ausgangspunkt für die Messung der **geographischen Länge** wählte man in England den Meridian von Greenwich, in Frankreich den von Paris, der 2° 20′ 15″ weiter östlich liegt, und außer diesen war auch die Zählung nach dem zwischen den Inseln Ferro und Tenerifa liegenden Meridian sehr verbreitet, welcher 17° 39′ 45″ westlich von Greenwich liegt. Überwiegend wird bereits der Meridian von Greenwich als Ausgangsmeridian für die Längenzählungen verwendet; der Meridian von Görlitz, welcher der mitteleuropäischen Zeit entspricht, liegt genau 15° östlich davon und hat daher gerade um eine Stunde früher Mittag.

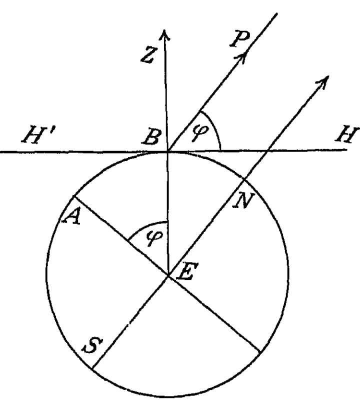


Fig. 363.

Die Längenunterschiede werden dadurch bestimmt, dass man die mittlere Sonnenzeit beider Orte in demselben Augenblicke vergleicht. Um diese Zeitdifferenz zu bestimmen, hat man früher die an beiden Orten bemerkbare Verfinsterung der Jupitertrabanten beobachtet, seit 1839 wird sie aber nach dem Vorschlage des Mathematikers Gauß auf telegraphischem Wege festgestellt.

Die Massenbestimmung der Erde. Erst durch die im Jahre 1682 erfolgte Gradmessung durch Picard kam Newton in die Lage, die schon längst gehegte Vermuthung zahlenmäßig zu bekräftigen, dass es die im verkehrten Verhältnisse mit dem Quadrate der Entfernung abnehmende Gravitation der Erde sei, welche sowohl die Körper auf der Erdoberfläche anzieht, wie auch den Mond an seine Bahn fesselt. Cavendish zeigte hierauf im Jahre 1798, dass diese Kraft nicht nur zwischen Massen mit kosmischen Dimensionen wirksam sei, sondern dass jede Masse von einem entsprechenden Gravitationsfelde umgeben sei, und bestimmte auch die Gravitationsconstante. Daraus konnte er auch die Masse der Erde berechnen, welche eine ent-

sprechend größere Beschleunigung hervorruft als die 158 kg Blei, deren Anziehungskraft er gemessen hatte. Er gelangte fast zum gleichen Resultate, welches spätere sorgfältigere Messungen ebenfalls ergaben, dass nämlich die Erde eine durchschnittliche Dichte von etwa 5·6 haben müsse, damit ihre Masse auf der Oberfläche eine Beschleunigung von 981 (cm sec^{-1}) hervorruft. Auf Grund dieser Bestimmung lässt sich auch die Masse und Dichte für die Sonne und die übrigen Planeten feststellen. Nach den Berechnungen Bessels beträgt die Oberfläche der Erde 51.10^7 km^2, ihr Volumen 1083.10^9 km^3, und sie enthält eine Masse von 603.10^{20} kg.

Auf die Gravitationswirkung sind auch die Lothablenkungen zurückzuführen, die in der Nähe großer Gebirgsmassen auftreten. Sie beträgt unter dem Einflusse der Alpen in Genf 6·4", in Bern 7·4" und in Mailand 12·8". Für die zu beiden Seiten des Kaukasus liegenden Städte Duschel und Wladikawkas beträgt die Differenz zwischen dem astronomisch und geodätisch gemessenen Breitenunterschiede 47·8", obwohl sie kaum einen Bogengrad von einander entfernt sind.

Ebbe und Flut. Die Stellung der Erde im Sonnensysteme, und zwar hauptsächlich gegenüber der Sonne und dem Monde, ist naturgemäß eine Gleichgewichtslage, die sich mit den Stellungsveränderungen aller drei Himmelskörper ändern muss. Die Dimensionen der Erde sind aber so groß, dass die Gleichgewichtsbedingungen nicht für alle Theile der Erde dieselben sind, daher führen die leichtbeweglichen Wassermassen auf der Oberfläche etwas andere Bewegungen aus als der feste Erdkörper.

Die Folge davon ist die Entstehung der in den größeren Meeresgebieten auftretenden Flutwelle. Ebbe und Flut oder die Gezeiten (Tiden) treten immer nach einem Zwischenraume von 12^h 25' ein, weshalb auf jeden Mondumlauf zwei Fluten entfallen. Die Ebbe tritt 6^h 13' nach der Flut ein. Die Höhe derselben erreicht sowohl zur Zeit des Vollmondes wie auch zur Zeit des Neumondes ihr Maximum in der sogenannten „Springflut", während mit dem ersten und letzten Mondesviertel die etwas weniger als halb so großen „Nippfluten" auftreten. Eine im wesentlichen richtige Erklärung dieser Erscheinung hat schon Newton angegeben, später befassten sich mit diesem Gegenstande besonders die Mathematiker Daniel Bernoulli, Leonhard Euler, und vor allem im Jahre 1790 Pierre Simon Graf Laplace.

Nehmen wir an, die Erde sei gleichmäßig mit Wasser bedeckt, so werden sich bei der Bewegung der Erde vom Aphel zum Perihel die der Sonne zugewendeten Wassermassen derselben mit größerer Beschleunigung g_3 (Fig. 364) nähern als die Erde, und diese wieder rascher als die von der Sonne abgewendeten Wassermassen (g_1). Die letzteren entfernen sich also vom Erdmittelpunkte ebenso, wie die ersteren.

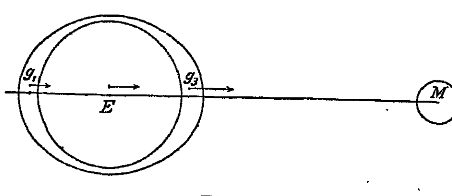


Fig. 364.

Wenn sich hierauf die Entfernung zwischen Erde und Sonne vom Perihel bis zum Aphel vergrößert, so eilen die von der Sonne abgewendeten Massen infolge der Fliehkraft der Erde voraus, und diese den Wassermassen, welche der Sonne zugewendet sind. Es treten also in beiden Fällen zwei Wellenberge auf, und daher wird die Erde bei ihrer täglichen Drehung von zwei

Flutwellen, von der „Zenith- und Nadirflut", umkreist. Demnach treten auch zur Zeit der Äquinoctien, wo sich die Annäherung, beziehungsweise Entfernung am schnellsten vollzieht, die Fluten stärker auf. Dieselben Vorgänge, welche die Distanzveränderung bei der Bewegung um die Sonne hervorruft, treten beim Monde in jedem Monate auf; die Wirkung ist aber trotz der kleinen Excentricität der Mondbahn wegen der geringeren Entfernung des Mondes viel stärker, aber gleichmäßiger als bei der Sonne. Zur Zeit des Vollmondes deckt sich auf der einen Seite der Erde die Zenithflut des Mondes mit der Nadirflut der Sonne, auf der anderen die Nadirflut des Mondes mit der Zenithflut der Sonne; beide Wirkungen addieren sich also. Zur Zeit des Neumondes fallen die beiden Zenith-, wie auch die beiden Nadirfluten zusammen und erzielen wieder eine Gesammtwirkung, die der Summe entspricht. Beim ersten und letzten Viertel fallen dagegen immer je eine Ebbe und eine Flut zusammen, wobei aber die Flut des Mondes überwiegt und nur mit der Differenz beider Fluthöhen auftritt.

Das Größenverhältnis beider Fluten lässt sich auch aus dem Massen- und Entfernungsverhältnis von Sonne und Mond erklären. Die Beschleunigung, mit der sich die Massen im Erdmittelpunkte dem Monde zu nähern suchen, ist $\frac{kM}{(60r)^2}$, wenn M die Masse des Mondes, k die Gravitationsconstante und r den Erdradius bedeutet. Auf der dem Monde zugewendeten Seite beträgt diese Beschleunigung nur mehr $\frac{kM}{(60-1)^2 r^2}$ und ist mithin um $\frac{kM}{r^2}\left(\frac{1}{(60-1)^2} - \frac{1}{60^2}\right) = \frac{kM}{r^2} \cdot \frac{(60+59)\,(60-59)}{59^2\,60^2}$ annähernd also um $\frac{kM}{r^2} \cdot \frac{2.60}{60^4} = \frac{2kM}{60^3 r^2} = g_M$ größer als die Beschleunigung im Mittelpunkte. Mit dieser Beschleunigung suchen sich also die Wassermassen vom Mittelpunkte der Erde zu entfernen. Ungefähr mit derselben Beschleunigung entfernt sich der Erdmittelpunkt von den Wassermassen der Nadirflut. Wäre der Mond 400 mal weiter entfernt, so wäre diese Beschleunigung $\frac{2kM}{(60 \times 400)^3 r^2}$. Da aber die in dieser Entfernung befindliche Sonne eine $27 . 10^6$ mal größere Masse besitzt, so ist die Beschleunigung, welche die Massen infolge der Sonnenwirkung vom Mittelpunkte der Erde zu entfernen sucht $\frac{2kM . 27 . 10^6}{(60 \times 400)^3 r^2} = g_S$. Daraus ergibt sich das Verhältnis $g_S : g_M = 27 : 64 = 0{\cdot}4$. Die Summe der beiden Wirkungen verhält sich daher zur fluterregenden Wirkung des Mondes allein, also $\left(g_M + g_S\right) : g_M = 91 : 64$, und daher ist $g_M + g_S = 1{\cdot}4\ g_M$ und $g_M - g_S = 0{\cdot}6\ g_M$; es ist daher den wirklichen Verhältnissen entsprechend $\left(g_M + g_S\right) : \left(g_M - g_S\right) = 1{\cdot}4 : 0{\cdot}6$.

Während die Hebung des Meeresniveaus durch die Flut auf „hoher See" im Durchschnitt kaum einen Meter beträgt, stellen sich an manchen Küsten, wo sich die Wassermessen stauen, wie z. B. im Hafen von St. Malo, Fluten ein, die eine Höhe von 16 m erreichen. In Binnenmeeren sind die Fluthöhen viel geringer und in höhern Breiten kleiner als in den Äquatorialgegenden. Die Fluthöhe ist nicht zu allen Zeiten des Jahres gleich groß und erreicht ihre höchsten Werte zur Zeit der Tag- und Nachtgleiche. Die hin- und zurückfließenden Wassermassen werden auch durch die horizontale Gliederung der Küste in mannigfacher Weise verschoben, wodurch die Flut an verschiedenen Orten ziemlich lange hinter der Culmination des Mondes zurückbleibt. Diese Verspätung der Flut bezeichnet man als die „Hafenzeit". Sie beträgt z. B. in Hamburg 5^h, in Calais $11^h\ 49'$, in Lissabon 4^h und in Gibraltar 0^h.

Die Erdwärme. Die Temperaturveränderungen an der Erdoberfläche hängen lediglich von der Sonnenstrahlung ab, die allerdings durch die Luftschichte, welche die Erde umgibt, und besonders durch die in derselben vorkommenden Verdunstungs- und Condensationsvorgänge bald mehr, bald weniger geschwächt wird. Die Temperatursteigerung, welche der Erdboden infolge der Tageswärme erfährt, erstreckt sich höchstens bis auf 1·5 m und auch die Sommerwärme dringt nicht tiefer als etwa 30 m in das Erdinnere ein. Von hier an steigt die Temperatur durchschnittlich um je 1° C, so oft wir um 33 m tiefer eindringen. Diese sogenannte „geothermische Tiefenstube" ist an manchen Orten geringer und daher die Temperaturzunahme eine raschere; so ist sie z. B. bei Oberstätten in Elsaß 8 m. An anderen Orten wie z. B. in der Calumet and Hecla-Mine in Nordamerika ist sie dagegen 70 m.

Für eine von der Sonnenwärme ganz unabhängige Zunahme der Temperatur in größeren Tiefen sprechen ferner die vielen heißen Quellen in den verschiedensten Gegenden. So zeigen die Thermen von Wiesbaden eine Temperatur von 70° C, die von Karlsbad 74° C und die von Burscheid 78° C. Der Geysir auf der Insel Island füllt sein Becken mit Wasser, das fast die Temperatur von 90° C erreicht, und in größeren Tiefen seines Schachtes wurden Temperaturen bis zu 127° C gemessen. Steigt folglich in demselben das Wasser, welches nur durch den im Schachte herrschenden Druck am Sieden verhindert wurde, so hoch empor, dass seine Spannkraft die Last der noch darüber befindlichen Wassermassen zu überwinden vermag, so werden die letzteren mit großer Kraft beim Ausbruche des Geysirs in die Luft geschleudert, wobei sich der Druck im Schachte noch vermindert, und daher schreitet dann die Dampfentwicklung in immer größere Tiefen fort, bis der Schacht größtentheils entleert ist.

Die geologische Beschaffenheit des Erdbodens bezeugt, dass in längstvergangenen Zeiten an vielen Stellen gewaltige und ausgedehnte Eruptionen feurigflüssiger Massen stattfanden, und die noch in Thätigkeit befindlichen Vulcane beweisen ebenfalls, dass in relativ geringen Tiefen das Erdinnere noch immer in diesem Zustande ist. Bei einer Temperaturzunahme von 1° C für je 33 m herrscht schon in einer Tiefe von 33 km eine Temperatur von 1000° C, bei der sich die meisten Metalle im weißglühenden Zustande befinden; die erkaltete, feste Erdkruste hat also bei dieser Annahme eine Dicke, die kaum 1 : 200 des Erdhalbmessers ausmacht und bei einem stärkeren Ansteigen der Temperatur noch dünner sein muss. Es ist daher auch nicht ausgeschlossen, dass die Erdrinde noch immer kleineren Deformationen unterworfen ist.

Der Erdmagnetismus. Die ganze Erdoberfläche ist von einem magnetischen Felde umgeben, dessen Beschaffenheit die Isogonen, Isoclinen und Isodynamen erkennen lassen. Der Verlauf der Isoclinen (Fig. 365), die sich den Parallelkreisen ziemlich gut anschließen, ist insoferne für die Form des magnetischen Feldes besonders charakteristisch, weil ja die Inclinationsnadel die Richtung der Kraftlinien angibt, die also ziemlich symmetrisch aus der Umgebung des magnetischen Nordpoles emporsteigen und gegen den magnetischen Südpol convergieren. Einen viel unregelmäßigeren Verlauf zeigen bereits die Isodynamen, welche die Feldstärke an den verschiedenen Stellen der Erdoberfläche angeben. Diese nimmt bis zum geographischen Nordpol zu und besitzt im südlichen Theile des atlantischen Oceans ein Minimum und in der Nähe des Südpoles wieder ein Maximum, das aber stärker ist

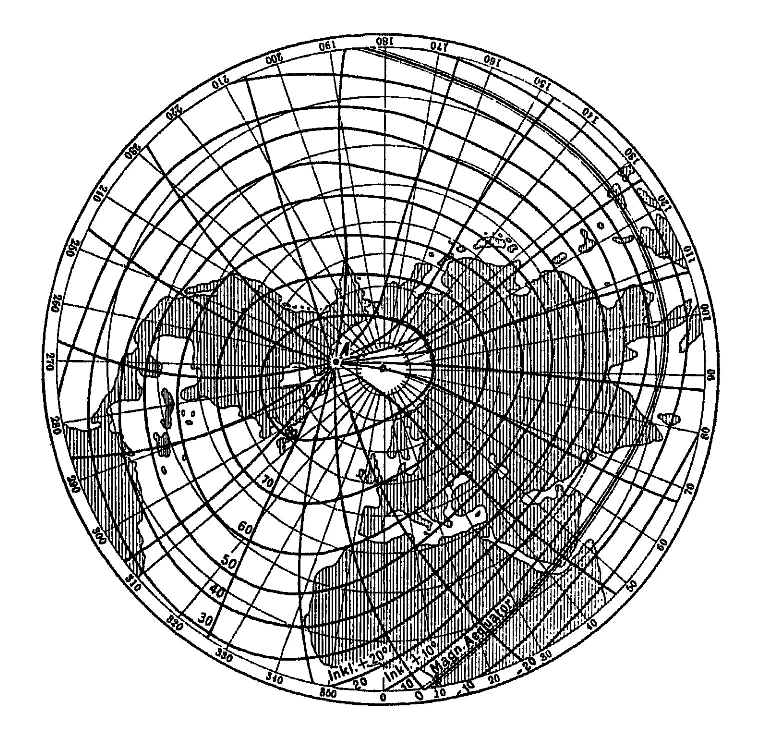


Fig. 365.

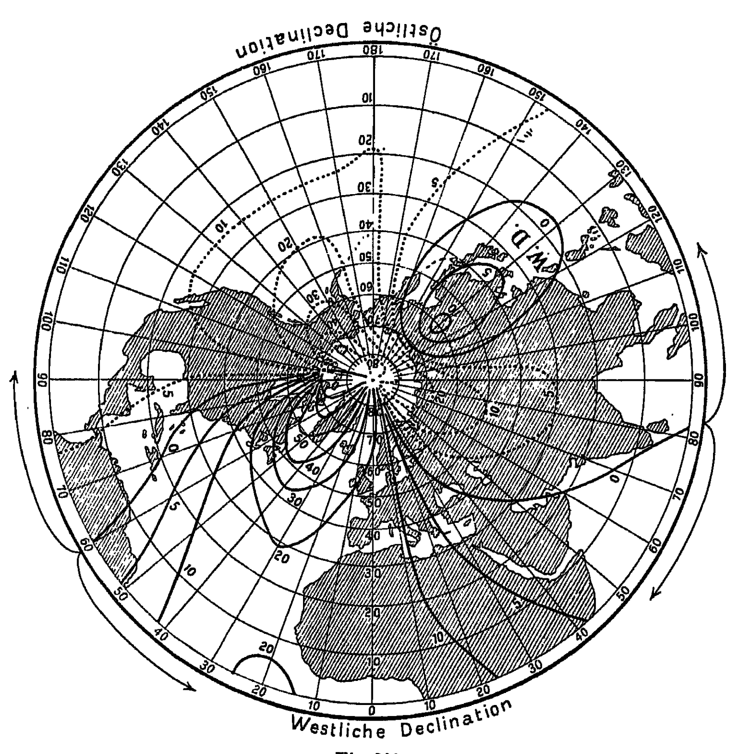


Fig. 366.

als das des Nordpoles. Noch unregelmäßiger verlaufen die Isogonen, welche die Orte gleicher Declination miteinander verbinden. (Fig. 366.) Die complicierte Gestalt dieses Liniensystemes hat darin ihren Grund, dass sie nicht das erdmagnetische Feld als solches, sondern seine Beziehung zum geographischen Gradnetze angeben, mit dem die magnetischen Kraftlinien nicht in einem naturgemäßen Zusammenhange stehen. Zur Stelle des magnetischen Nordpoles gelangte Capitain Ross im Jahre 1833 bei 70° 5′ n. Br. und 96° 46′ w. L. v. Greenwich auf der Melville-Insel im Norden Amerikas. Von hier gehen die Kraftlinien aus, während die Isoclinen diesen Punkt kreisförmig umschließen. Schon die Inclinationslinie von 80° umspannt auch den geographischen Nordpol (Fig. 365).

Ein vom magnetischen Nordpol ausgehendes Gradnetz weicht von dem Kraftliniensystem relativ wenig ab. Wo dies aber der Fall ist, dürften die Verschiebungen eine Folge der localen Beschaffenheit des Bodens sein, wie z. B. in der Umgebung der eisenreichen Insel Elba, wo die Magnetnadel um etwa 2° mehr nach Westen weist als in der Umgebung. Alle diese das magnetische Feld charakterisierenden Linien sind aber keineswegs unveränderlich, sondern täglichen, jährlichen und säcularen „Variationen" unterworfen. So war für Paris im Jahre 1580 die Declination eine östliche von 11° 30′, im Jahre 1663 war sie gleich Null, im Jahre 1700 8° westlich und erreichte im Jahre 1814 ihren größten Wert von 22° 34′. Jetzt beträgt sie $14^1/_2$° westlich und nimmt jährlich um 6′ ab. Ihr jährliches Maximum erreicht die Declination im Herbste, ihr Minimum im Frühlinge. Auch die täglichen Variationen erreichen bereits in unseren Gegenden gegen 6′ und nehmen gegen Norden zu. Abgesehen von diesen Variationen entsprach die Declination in Mitteleuropa zu Beginn des Jahres 1901 den in der folgenden Tabelle angegebenen Werten:

Östlich von Greenwich	nördlicher Breite										
	45°	46°	47°	48°	49°	50°	51°	52°	53°	54°	55°
6°	12° 20′	12° 30′	12° 38′	12° 45′	12° 52′	13° —	13° 7′	13° 8′	13° 19′	13° 30′	13° 36′
8°	11° 34′	11° 42′	11° 47′	11° 54″	12° —	12° 6′	12° 6′	12° 11′	12° 14′	12° 22′	12° 37′
10°	10° 46′	10° 55′	10° 57′	11° —	11° 5′	11° 6′	11° 8′	11° 12′	11° 14′	11° 16′	11° 28′
12°	9° 56′	10° 1′	10° 6′	10° 8′	10° 9′	10° 10′	10° 6′	10° 10′	10° 17′	10° 17′	10° 18′
14°	9° 17′	9° 10′	9° 12′	9° 10′	9° 10′	9° 6′	9° 5′	9° 6′	9° 6′	9° —	8° 46′
16°	8° 15′	8° 14′	8° 12′	8° 10′	8° 9′	8° 7′	8° 5′	8° 4′	8° 2′	7° 48′	7° 31′
18°	7° 21′	7° 18′	7° 14′	7° 19′	7° 11′	7° 11′	7° 7′	7° 6′	7° 3′	6° 59′	6° 55′
20°	6° 28′	6° 23′	6° 17′	6° 15′	6° 14′	6° 11′	6° 7′	6° 4′	5° 58′	5° 56′	6° 56′
22°	5° 38′	5° 34′	5° 31′	5° 27′	5° 14′	5° 15′	5° 6′	5°	4° 55′	4° 51′	4° 49′

Außer den eben angeführten regelmäßigen Schwankungen treten aber auch noch bei den sogenannten „magnetischen Gewittern" ganz unregelmäßig verlaufende „Störungen" oder „Perturbationen" auf, die im hohen Norden meist mit kräftigen Nordlichterscheinungen verknüpft sind. Zwischen den Variationen des Erdmagnetismus und dem Zu- und Abnehmen der Sonnenflecken scheint insoferne ein Zusammenhang zu bestehen, als beide Erscheinungen einer etwa 11jährigen Periode unterliegen. Gilbert suchte (1600) den Erdmagnetismus dadurch zu erklären, dass er annahm, es befände sich im Innern der Erde ein Magnet, von dem diese Wirkung ausgehe, und auch Gauß glaubte ihn bei seinen grundlegenden Studien über den Erdmagnetismus, welche zur Aufstellung des absoluten Maßsystems führten, darauf zurückführen zu sollen. Dieser Annahme steht aber die große Schwierigkeit entgegen, dass selbst die besten Eisensorten bei einer Temperatur von 600—700° C bereits vollständig unmagnetisch

sind und daher das Erdinnere sich schon in geringen Tiefen gegen den Magnetismus ganz indifferent verhalten muss. Wir müssen also die Ursache des Erdmagnetismus in den nahe an der Oberfläche verlaufenden elektrischen Erdströmen suchen, zu deren Gunsten auch die große Beweglichkeit des erdmagnetischen Feldes spricht. Das von denselben hervorgerufene magnetische Feld kann immerhin durch die in tieferen Erdschichten vorkommenden Einlagerungen von Eisen in mannigfacher Weise abgeändert werden. Für deren Existenz sprechen nicht nur geologische Beobachtungen, sondern auch der Umstand, dass die durchschnittliche Dichte der gesammten Erde viel größer ist, als die der obersten Schichte.

Meteorologie.

Der Erdball ist von einer hohen Luftschichte, der Atmosphäre, umgeben, die der Hauptsache nach 21 Volumtheile Sauerstoff, 79 Volumtheile Stickstoff und etwa 1 Theil Argon enthält. Von einer Höhe der Atmosphäre in dem Sinne, wie von der Tiefe des Meeres, kann man dabei nicht sprechen, weil die Dichte der Luft mit zunehmender Höhe continuierlich abnimmt, und zwar gibt die zur barometrischen Höhenmessung verwendete Formel wenigstens näherungsweise an, in welchem Maße sich der Luftdruck, also auch die Dichte mit der Höhe vermindert.

Er beträgt in einer Höhe von	0	500	1000	2000	3000	4000	5000	10000 m
bei einer Temperatur von 0° C	76	71·3	67	59	51·7	45·3	39·5	19·3 cm
„ „ „ „ 15° C	76	71·5	67·5	59·8	52·8	46·6	41	20·9 „

Andererseits lässt sich den Dämmerungserscheinungen entnehmen, dass sich in einer Höhe von etwa 64 km die letzten optisch wirksamen Luftschichten befinden. Aus den Erscheinungen bei Sternschnuppenfällen und beim Nordlichte kann man aber schließen, dass selbst in einer Entfernung von 300 km Spuren von Luft vorhanden sein müssen. Außer den genannten Hauptbestandtheilen enthält die Luft auch die allotrope Modification des Sauerstoffes, das stark oxydierende Ozon, in wechselnder Menge, und dieses erzeugt durch seine Einwirkung auf organische Stoffe geringe Spuren von salpetriger Säure und Salpetersäure. Von viel größerer Bedeutung, besonders für das organische Leben, sind der Gehalt an Kohlensäure, der durchschnittlich etwa 0·03 % des Volumens ausmacht, aber in der Nähe von Städten bis zu 0·14 %, und in Fabriksräumen auf 0·44 % ansteigt, und vor allem die Wasserdämpfe.

Nebst diesen gasförmigen Bestandtheilen enthält aber die Luft auch noch eine ungeheure Menge fester Staubtheilchen, die auf das Verhalten der Atmosphäre in mannigfacher Weise einwirken. Selbst an der Meeresküste befinden sich Tausende in einem Cubikcentimeter. In den Straßen der Städte steigt ihre Zahl schon auf Hunderttausende, und in Zimmern, besonders wenn geraucht wird oder Gasflammen brennen, auf mehrere Millionen. In Fabriksräumen wurden sogar 175 mg Staub pro m^3 nachgewiesen. Er übt nicht nur einen großen Einfluss auf die thermischen und optischen Eigenschaften der Luft, sondern vor allem auf die Condensation der in der Luft enthaltenen Wasserdämpfe aus.

Das Gesetz, welches zunächst die in der Atmosphäre vorkommenden Veränderungen beherrscht, ist das Mariotte-Gay-Lussac'sche Gesetz. Die fortwährenden Schwankungen des Luftdruckes rufen aber nicht nur Volumveränderungen, sondern auch ein Steigen oder Sinken der Temperatur hervor, das durch den Feuchtigkeitsgehalt oft wesentlich verändert wird. Die sonst diathermane Luft wird außerdem infolge der Beimengung von Staubtheilchen bald durch die Sonnenstrahlen erwärmt, bald bei der Ausstrahlung abgekühlt.

Um die mit einer Druckerhöhung verbundene Erwärmung zu finden, müssen wir ihr Verhältnis zur gleichzeitigen Arbeitsleistung in Rechnung ziehen. Wenn z. B. der Barometerstand von 75 auf 76 cm gestiegen ist, so hat der Luftdruck im Verhältnis 75 : 76 = 1 : 1·0133 zugenommen, und zwar entfällt von der relativen Druckerhöhung um 0·0133 der Bruchtheil 0·0133 : 1·41 = 0·0094 auf die Verdichtung und der Rest von 0·0039 auf die dadurch herbeigeführte Erwärmung. Die Druckerhöhung beziehungsweise Volumsverminderung im Verhältnis von 1 : 1·0039 entspricht aber nahezu der Ausdehnung bei einer Erwärmung von 1° C, die 1·00367 beträgt. So oft also der Barometerstand um 1 cm steigt oder sinkt, nimmt schon durch diese Druckveränderung die Temperatur der Luft um 1° C zu oder ab.

Die auf Schwankungen des Luftdruckes zurückzuführenden Temperaturänderungen werden durch den Feuchtigkeitsgehalt der Luft in dem Sinne beeinflusst, dass sich die feuchte Luft bei einer Druckverminderung weniger abkühlt als die trockene, aber bei Verdichtungen ungefähr gleich stark erwärmt. Ein m^3 Luft wiegt bei 0° C und 76 cm Barometerstand 1·293 kg und demnach ein ebenso großes Volumen Wasserdampf 1·293 . 0·622 = 0·804 kg. Da bei 0° C die Spannkraft der gesättigten Wasserdämpfe 0·49 cm beträgt, so besitzen die in 1 m^3 enthaltenen Wasserdämpfe ein Gewicht von 0·804 . (0·49 : 76) = 5·2 g. Auf 1 kg Luft entfallen unter gleichen Umständen nahezu 4 g Wasserdampf. Bei 10° C dehnt sich 1 m^3 Gas um 0·0367 m^3 aus; mithin wiegt bei 10° C ein m^3 Wasserdampf 0·804 (1 — 0·0367) = 0·774 kg. Die Spannkraft der gesättigten Dämpfe ist bei dieser Temperatur der Spannkraftstabelle zufolge 0·914 cm, und daher entfallen auf einen m^3 mit Feuchtigkeit gesättigter Luft 0·774 (0·914 : 76) = 0·0093 kg = 9·3 g Wasserdampf. Durch derartige Berechnungen gelangen wir zur folgenden Tabelle, nach welcher die Luft

bei einer Temperatur von	0	5	10	15	20	25	30	35	40 Grad Celsius
pro m^3	5·2	6·7	9·3	12·7	17	22·9	30	39	54 g
pro kg	4	5·3	7·4	10·3	13·8	18·6	25·3	32·9	43 „

Wasserdampf enthält. Ist die Luft bei 15° C mit Wasserdämpfen gesättigt und die Temperatur sinkt um 10° C, so werden nach dieser Tabelle 5 g Wasserdampf pro kg Luft condensiert; fällt die Temperatur um 1° C, so werden mithin pro kg 0·5 g Wasser condensiert. Da bei der Condensation von 1 g 537 kleine Calorien frei werden, so erfährt dieses kg Luft bei der specifischen Wärme 0·2375 durch die freigewordene Wärme von 0·268 einer großen Calorie eine Erwärmung um

$$0{\cdot}268 : 0{\cdot}2375 = 1{\cdot}1^\circ \text{ C}.$$

Die freigewordene Wärme vermag also die erfolgte Abkühlung vollständig auszugleichen. Tritt aber eine Temperaturerniedrigung um 1° C ein, obwohl die Luft vollständig mit Feuchtigkeit gesättigt war, so müssen wir annehmen, dass die Temperatur bei trockener Luft um etwa 2° C gefallen wäre.

Die Condensationserscheinungen der Atmosphäre sind wegen der fortwährenden Druck- und Temperaturveränderungen so mannigfaltig und wechselvoll, dass es nur durch ausgedehnte und regelmäßige Beobachtungen gelungen ist, die Gesetzmäßigkeiten festzustellen, welche „Wind und Wetter" beherrschen.

Das erste meteorologische Beobachtungsgesetz begründete schon im 17. Jahrhunderte Herzog Ferdinand II. von Toscana. Alexander von Humboldt entwarf in seinem berühmten Werke „Kosmos" im Jahre 1858 die allgemeinen Grundzüge für eine auf Beobachtungen aufgebaute Meteorologie, und Dove hat zuerst die gewonnenen Beobachtungen systematisch geordnet und wissenschaftlich behandelt. Derzeit besteht ein über alle Culturstaaten ausgedehntes Netz von Beobachtungsstationen, welche alle atmosphärischen Erscheinungen genau registrieren und telegraphisch an einzelne Centralstellen berichten. Hier werden täglich aus den verschiedenen Angaben über Temperatur, Luftdruck, Windrichtung und Intensität, sowie auch über Art und Stärke der Niederschläge die „synoptischen Wetterkarten" zusammengestellt. Aus einer Reihe solcher Karten kann man nicht nur die Witterung in ausgedehnten Landgebieten, sondern auch den Witterungsverlauf entnehmen.

Die Strahlung der Sonne und des Himmels. Die Sonnenwärme wird uns ausschließlich durch Strahlung vermittelt, und wir können letztere in der Weise messen, dass wir sie in Wärme verwandeln und diese calorimetrisch bestimmen. Man lässt zu diesem Zwecke die Sonnenstrahlen auf eine berußte Fläche fallen, wodurch sie in Wärme umgesetzt werden, und die Temperaturzunahme, welche dadurch eine bestimmte Wassermenge erfährt, wird an einem Thermometer abgelesen. Da die Luft meistens eine beträchtliche Wasser-

menge und unzählig viele Staubtheilchen enthält, die einen großen Theil der Wärme absorbieren, so können wir die so gemessene Strahlung noch nicht als die Strahlung der Sonne bezeichnen. Bei Berücksichtigung aller in Betracht kommenden Umstände würde, wenn die Sonne im Zenith stünde, nach Violle die Strahlung auf dem Montblanc (4810 m) noch 94% der Gesammtstrahlung betragen, auf dem Bossongletscher (1220 m) noch 79%, und in Paris (60 m) nur mehr 68%. Bei niedrigerem Sonnenstande nimmt die Strahlung noch stärker ab. An der Grenze der Atmosphäre beträgt die Strahlung pro Minute etwa vier Calorien pro cm^2. Die Strahlung der Sterne und des Mondes ist so gering, dass sie jedenfalls keinen merklichen Einfluss auszuüben vermag. Dagegen kann die Strahlung, welche die Atmosphäre in sich aufnimmt und dann wieder der Erde zusendet, bis auf 0·37 Calorien ansteigen. Andererseits wird die Ausstrahlung der Erdwärme besonders bei Nebelwetter durch die Atmosphäre wesentlich verhindert.

Die Temperatur.

Bei der Bestimmung der Temperatur muss jede Strahlung von dem zur Messung bestimmten Thermometer sorgfältig ferngehalten werden. Solche Thermometer werden daher mit einer spiegelnden oder wenigstens weiß angestrichenen Metallhülle umgeben, und es empfiehlt sich sogar, die Temperatur der Luft dadurch zu bestimmen, dass man sie aus der nächsten Umgebung durch einen kleinen Ventilator in den Apparat treibt, in welchem sich das Thermometer befindet. Die Bestimmung der Lufttemperatur muss in der Sonne wie im Schatten zum gleichen Resultate führen. Um den mittleren „Gang der Temperatur" während eines Tages zu finden, nimmt man für jede Tagesstunde den Mittelwert aus den Beobachtungen mehrerer Tage; man erhält ein anschauliches Bild dieser Temperaturveränderungen, wenn man die Tagesstunden als Abscissen und die Temperaturen als Ordinaten aufträgt. Dabei ergibt sich, dass die größten Differenzen während eines Tages sich in solchen Orten einstellen, die ausgesprochen continentales Klima besitzen, viel geringer sind die Schwankungen in der Nähe der Meeresküste, und sehr schwach in höheren Luftschichten und auf den Spitzen hoher Berge. Sie sind ferner viel stärker an heiteren Tagen als an trüben, und im Sommer größer als im Winter. Der Mittelwert aller stündlichen Temperaturangaben gibt das „Tagesmittel". Um aber dasselbe ohne stündliche Ablesungen festzustellen, wählt man drei solche Beobachtungsstunden, deren Mittelwert annäherungsweise zum gleichen Resultate führt, wie die stündliche Beobachtung, gewöhnlich 7^h vormittags, 2^h nachmittags und 9^h abends, oder auch 8^h früh, 2^h nachmittags und 8^h abends. Die Tagesmittel werden zu Mittelwerten des Monates vereiniget, und dann wieder der Mittelwert desselben Monates für eine lange Reihe von Jahren berechnet. Durch Vergleichung dieser Werte für alle Monate des Jahres erhält man den „jährlichen Gang der Temperatur". Dieser zeigt in einem stark continentalen Klima weitgehende Schwankungen, geringere in höheren Ortslagen und die geringsten auf tropischen Inseln. Während z. B. die Temperatur in der sibirischen Beobachtungsstation Nertschinsk zwischen -29 und $+19^0$ C schwankt, beträgt die höchste und tiefste Mitteltemperatur in Paris 18^0 und $+2^0$ C, und auf der tropischen Insel Jaluit herrscht das ganze Jahr hindurch fast immer eine mittlere Temperatur, die zwischen 26 und 28^0 C liegt.

Um die Temperaturveränderungen im Laufe des Jahres für die verschiedensten Orte leichter überblicken zu können, hat A. v. Humboldt die Orte gleicher mittlerer Jahrestemperatur miteinander verbunden und als Isothermen bezeichnet; später hat man derartige Linien auch für die Mitteltemperaturen der einzelnen Monate construiert. Daraus kann man nicht nur den Zusammenhang dieser Temperaturverschiebungen mit der geographischen Breite, sondern auch die Abhängigkeit von der horizontalen und verticalen Gliederung für ganze Continente und für einzelne Gebiete, besonders aber den mildernden Einfluss großer Wassermassen deutlich erkennen. Dabei zeigt sich wieder, dass die Temperaturdifferenzen auf jener Halbkugel bedeutend größer sind, auf welcher der überwiegende Theil des Festlandes liegt. Ermittelt man die Mitteltemperatur, die auf jedem Parallelkreise herrschen würde, wenn die Land- und Wasservertheilung gleichmäßig wäre, so zeigt sich, dass verschieden gelegene Orte von dieser Temperatur oft ziemlich stark abweichen und die Verbindung aller Orte, deren mittlere Jahres- oder auch Monatstemperatur von diesem der geographischen Lage entsprechenden Mittelwert gleichstark abweicht, führt zur Construction der Isanomalen, weil diese Orte dieselbe „Anomalie“ besitzen. Solche Zusammenstellungen lassen auch auf den ersten Blick die klimatologische Bedeutung der Wasser- und Luftströmungen und rein localer Einflüsse erkennen. (Meteorologische Karten.)

Der Luftdruck und die Luftströmungen.

Während bei den Temperaturveränderungen im Allgemeinen eine einzige Hebung und Senkung auf jeden Tag entfällt, zeigt der Luftdruck jeden Tag zwei sich regelmäßig einstellende Maxima und Minima, und zwar fallen erstere etwa auf $9^h 40'$ morgens und abends. In tiefer gelegenen Orten ist das zweite Minimum viel stärker ausgeprägt als das erste, dagegen tritt in hochgelegenen Luftschichten das erste Minimum mehr hervor. Wenn wir von diesen, oft nur Bruchtheile von mm betragenden täglichen Schwankungen absehen und den mittleren Luftdruck des Tages bestimmen, ihn auf das Meeresniveau reducieren, d. h. die Größe des Luftdruckes berechnen, wie er an demselben Orte in der Höhe des Meeresniveaus herrschen würde, so erhalten wir die Isobaren, indem wir alle Orte gleichen reducierten Luftdruckes miteinander verbinden. Schon aus dem Umstande, dass diese Linien keineswegs Linien gleicher Witterung darstellen, folgt unmittelbar, dass es keinen Sinn hat, einem bestimmten Barometerstande eine bestimmte Witterung zuzuschreiben. Dagegen hängt die Windrichtung mit der Gestalt und dem Verlaufe der Isobaren eng zusammen. Verlaufen zwei Isobarenlinien längs einer bestimmten Strecke zueinander parallel, so strömt die Luft senkrecht zur Richtung der Isobaren von der Linie höheren nach der niederen Luftdruckes, und zwar mit einer Geschwindigkeit von ungefähr 3—5 ($m\,sec^{-1}$), wenn auf eine Entfernung von der Länge eines Meridiangrades, also auf 111 km ein Druckunterschied von 1 mm entfällt. Ein solches Luftdruckgefälle bezeichnet man als einen Gradienten. Nebst den so herbeigeführten Luftbewegungen in horizontaler Richtung treten auch infolge der Erwärmung an der Erdoberfläche oder durch die Abkühlung in höheren Luftschichten kräftige Luftströmungen in verticaler Richtung auf und führen so theilweise zu regelmäßigen, theilweise auch zu unregelmäßig wiederkehrenden Luftströmungen oder Winden.

Aus TRABERT, Meteorologie (Sammlung Göschen No. 54.)

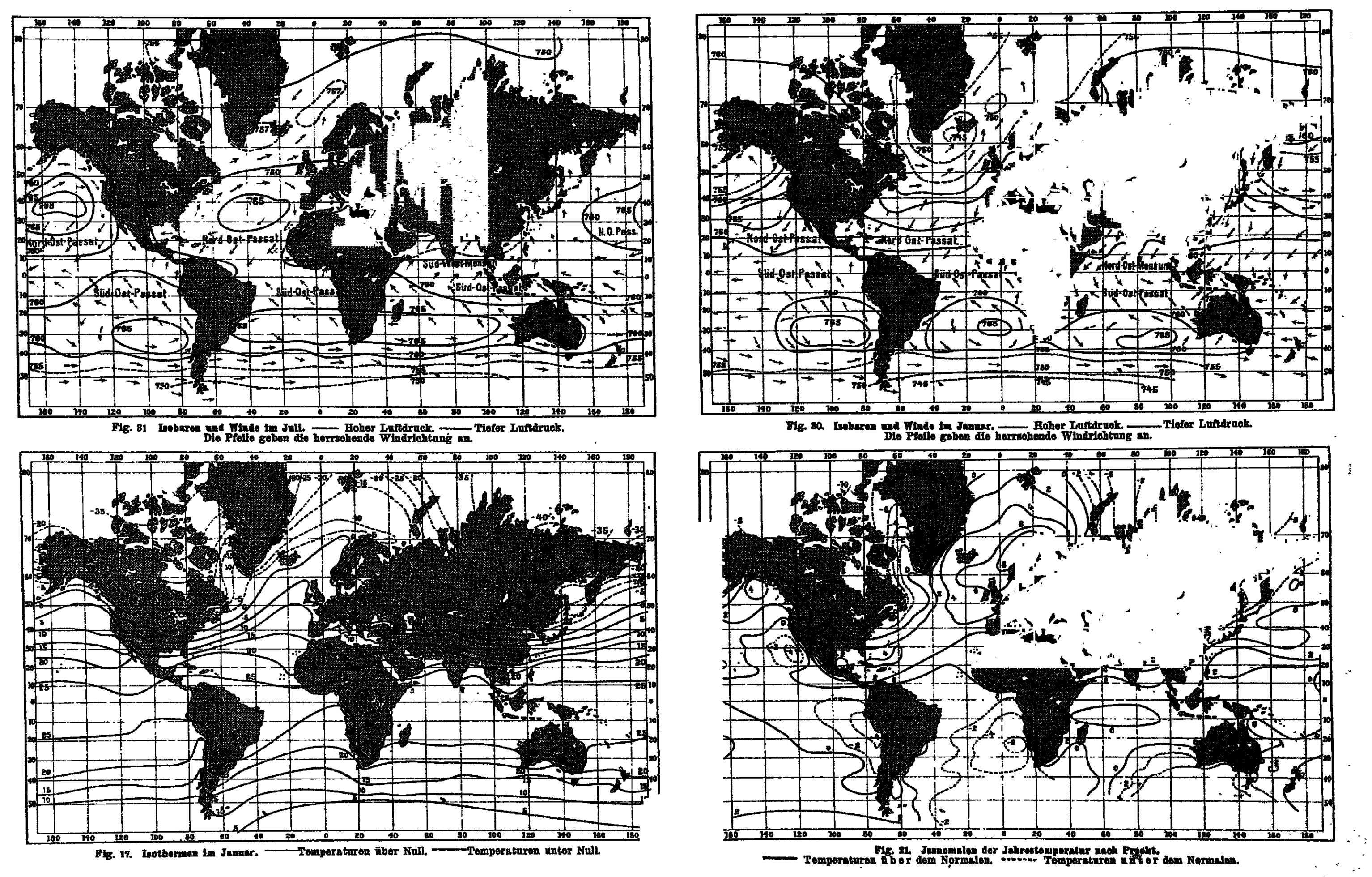


Fig. 31. Isobaren und Winde im Juli. ——— Hoher Luftdruck. ——— Tiefer Luftdruck. Die Pfeile geben die herrschende Windrichtung an.

Fig. 30. Isobaren und Winde im Januar. ——— Hoher Luftdruck. ——— Tiefer Luftdruck. Die Pfeile geben die herrschende Windrichtung an.

Fig. 17. Isothermen im Januar. ——— Temperaturen über Null. ——— Temperaturen unter Null.

Fig. 21. Isanomalen der Jahrestemperatur nach Precht. ——— Temperaturen über dem Normalen. -------- Temperaturen unter dem Normalen.

Alle diese Bewegungen erfahren durch die Rotation der Erde eine Ablenkung aus ihrer Richtung, die wir folgendermaßen feststellen können. Eine von der Erdoberfläche sich entfernende Luftmenge behält die Tangentialgeschwindigkeit bei, mit welcher sie ihren Parallelkreis verlassen hat, nimmt aber an der weiteren Rotation der Erde viel weniger Antheil. Infolgedessen müssen sich, von der festen Erdoberfläche aus betrachtet, solche Luftmassen scheinbar von Osten nach Westen bewegen, weil ihnen die Erde in der Richtung nach Osten vorauseilt. In der Mechanik haben wir jede Drehung durch einen Vector dargestellt, von dessen Spitze aus die Drehung im positiven, d. h. im entgegengesetzten Sinne des Zeigers einer Uhr erfolgt. Die Drehung der Erde stellen wir demnach durch einen Vector dar, der am Nordpol auf der Erde senkrecht steht (Fig. 367). Die scheinbare Drehung der Luft muss in diesem Falle durch einen gegen das Erdinnere, also nach Süden gerichteten Vector dargestellt werden, wie ihn der punktierte Pfeil angibt. Die Ablenkung eines von A aus in der Richtung des Meridianes nach Süden strömenden Windes finden wir somit, indem wir auf der Tangentialebene durch A den gegen das Erdinnere gerichteten Vector errichten und der Windrichtung eine Drehung im positiven Sinne geben, der zu einer Wendung nach Westen führt. Ist die Bewegung des Windes von B aus nach Norden gerichtet, so führt diese Drehung zu einer Ablenkung nach Osten. Auf der südlichen Hemisphäre ist der Vector der Erdrotation nach innen gerichtet und derjenige der Winddrehungsrichtung nach außen. Im Punkte A' müssen wir daher wieder den Vector nach außen errichten und für einen nach dem Äquator gerichteten Wind die Drehung nach links, also wieder im positiven Sinne vornehmen, um dessen Ablenkung zu finden, und wir ersehen daraus, dass alle gegen den Äquator gerichteten Winde nach Westen und die nach den Polen strömenden Winde nach Osten abgelenkt werden. Ähnlich verhält es sich mit den aufsteigenden und sinkenden Luftströmen. Der Drehungsvector eines Luftstromes, der von C aufwärts steigt, muss auf der Bewegung im Parallelkreise und auf der Windrichtung senkrecht stehen, also mit der Richtung des Meridianes zusammenfallen. Die positive Drehung führt zu einer Ablenkung nach Westen, und zwar auf der nördlichen wie auch auf der südlichen Halbkugel. Ein gegen den Ort D von oben nach unten gerichteter Luftstrom wird dagegen nach Osten abgelenkt, weil diese Ablenkung für den vom Ausgangspunkte der Strömung nach Süden gerichteten Vector dem positiven Drehungssinne entspricht. Alle aufsteigenden Luftströme werden also nach Westen und alle niedersteigenden nach Osten abgelenkt. Dieser Einfluss der Erddrehung macht sich auch bei den Meeresströmungen geltend.

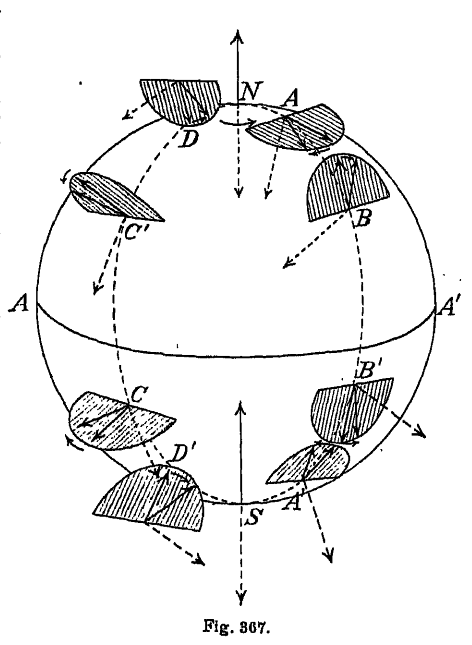


Fig. 367.

Vergleichen wir die mittleren Barometersände in den verschiedenen geographischen Breiten, so finden wir

auf der nördl. Hemisphäre in der Breite von	0°	15°	30°	45°	60°
einen mittleren Luftdruck von	75·8	75·87	76·26	76·19	75·92 cm

Sein Maximum erreicht er in der Breite von etwa 35°. Infolge der intensiven Erwärmung des Bodens in den Tropengegenden steigt hier die Luft empor und strömt dann an der Erdoberfläche von Norden und Süden her dem Äquator zu, in dessen Umgebung die horizontale Bewegung in eine verticale übergeht. Die so aus der „Region der Calmen" aufgestiegene Luft fließt hierauf in hochgelegenen Schichten nach Norden und Süden und kühlt sich dabei so stark ab, dass sie bereits in einer Breite von

30—35° in die Nähe des Erdbodens gelangt und besonders um den 35.° eine Stauung hervorruft, welche das Luftdruckmaximum herbeiführt. Von dieser Zone aus fließt die Luft sowohl nach Süden wie nach Norden, wodurch wir die im Verticalschnitt in Fig. 368 aufgezeichneten Strömungen erhalten. Durch die Drehung der Erde werden aber die unmittelbar über dem Erdboden hinstreichenden Winde innerhalb der beiden 30. Breitengrade nach Westen, die in höheren Schichten nach Norden fließenden Luftströmungen jedoch nach Osten abgelenkt. Innerhalb dieser Zone erhalten wir daher einen Passat, der nördlich vom Äquator aus Nordost weht, auf der südlichen Hemisphäre aber aus Südost kommt. Der in den höheren Regionen wehende Gegenpassat hat dieselbe Richtung, aber den entgegengesetzten Sinn. Außerhalb dieser Zone haben die Passate eine andere Richtung, sie kommen nämlich auf der nördlichen Hemisphäre aus Südwest und auf der südlichen aus Nordwest, und der Gegenpassat hat wieder dieselbe Richtung wie der Passat, aber den entgegengesetzten Sinn. Dieser Verlauf der Luftströmungen erfährt allerdings sehr oft locale Störungen. Endlich stellen sich auch häufig ganz unregelmäßige und schwer zu erklärende Luftbewegungen ein, die sich über weite Ländergebiete ausbreiten und vorübergehend das Strömungsbild in mannigfaltiger Weise verändern.

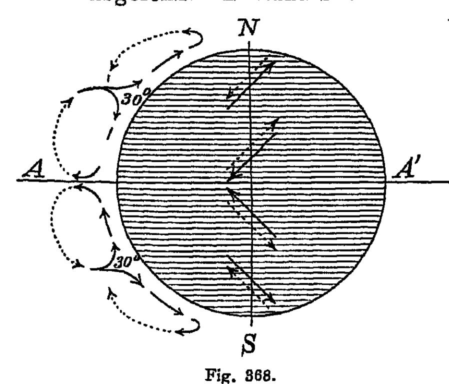


Fig. 368.

Zu den durch die localen Verhältnisse hervorgerufenen Luftströmungen gehören zunächst die Land- und Seewinde, welche an der Küste des Meeres und der Seen auftreten und sich bis tief in das Land hinein bemerkbar machen. Das tägliche Temperaturmaximum tritt auf dem Lande früher ein als über einer ausgedehnten Wasserfläche, da das Wasser viel größerer Wärmemengen bedarf, um die gleiche Temperatur zu erreichen wie das Land; es werden daher auch die über dem kühleren Wasser lagernden Luftmassen nicht so rasch erwärmt, während sich die Luft über dem Festlande bereits zu heben beginnt und damit hier eine Luftdruckverminderung hervorruft, welche die Seeluft veranlasst, landeinwärts zu strömen. Am Abend tritt bei fortschreitender Abkühlung eine Luftströmung im entgegengesetzten Sinne ein, da jetzt die Temperatur über dem Lande schneller und tiefer sinkt als oberhalb des Wassers.

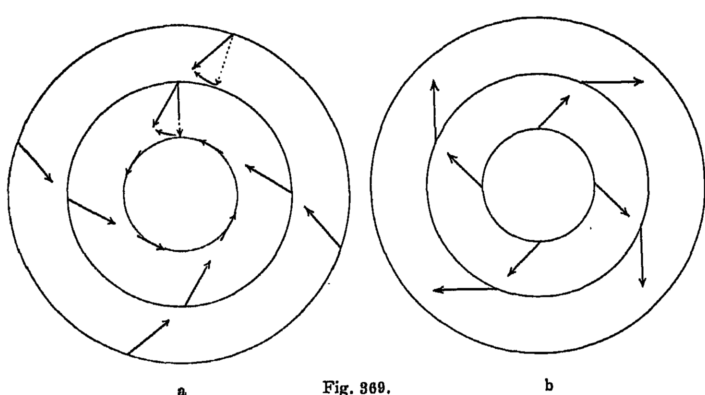
Eine ähnliche locale Luftverschiebung tritt in Gebirgsgegenden ein, wenn die Sonnenstrahlen am Morgen immer tiefer gegen die Thalsohle vordringen. Die Ausdehnung der erwärmten Luft wird eine um so größere sein, je tiefer das Thal ist, und wie das Wasser über die Ufer eines Flusses hinausfließt, wenn derselbe stark anschwillt, so ergießt sich auch die im Thale anschwellende Luft gegen die Anhöhen und wird als Bergwind bezeichnet. Abends tritt wieder die entgegengesetzte Bewegung ein, weil sich im Thale zuerst die Schatten einstellen und die dadurch abgekühlte Luft sich so stark zusammenzieht, dass die benachbarten Luftmassen in die entstandene Einsenkung zurückfließen und daher der Wind gegen das Thal weht.

Ist eine ausgedehntere Luftströmung, die unmittelbar über den Erdboden hinstreicht, gezwungen, rasch einen hohen Gebirgskamm zu überschreiten, so müssen die Luftmassen auf der einen Seite schnell gehoben werden, um bald darauf wieder in die Tiefe zu sinken. Dabei kühlen sich die aufsteigenden Luftmassen ab und werden bald mit Wasserdämpfen gesättigt sein, worauf die Condensation eintritt und große Wärmemengen frei werden. Dann stellen sich auch auf der „Luvseite" des Gebirges Regengüsse ein. Da auf eine Höhendifferenz von etwa 2000 m ein Unterschied des Luftdruckes von nahezu 16 cm Quecksilber entfällt und bei jedem cm die Temperatur der trockenen Luft um 1° C, die mit Feuchtigkeit gesättigte Luft in ihrer Temperatur aber nur halb so rasch sinkt, so wird z. B. die Temperatur der ansteigenden Luft von 15° C nicht bis auf 0°, sondern nur bis auf 8° C sinken, beim Niedersteigen auf der „Windschatten- oder Leeseite" jedoch um 16° C wärmer werden; hier werden sie also eine Temperatur von 24° C annehmen können. Eine charakteristische Eigenschaft des so entstandenen „warmen Windes" oder „Föhns", wie man ihn besonders in der Schweiz nennt, ist die ungeheuere Trockenheit, die er hervorruft, und die Geschwindigkeit des Temperaturwechsels besonders im Winter. Letzterer kommt natürlich viel stärker zum Vorschein, wenn der warme Wind von Süden kommend sich in kühlere Gegenden ergießt, als wenn er von Norden nach Süden strömend z. B. von den Alpen in die Poebene gelangt, in der ohnehin schon eine ähnliche Temperatur herrscht.

Ganz anderen Ursprunges ist die aus dem Karst in die Adria niederstürzende „Bora". Wenn sich nämlich in hoch gelegenen Gebirgsländern des Karstes große Mengen kalter Luft angesammelt und ausgebreitet haben, so stürzen dieselben oft von anderen Luftströmungen verdrängt mit großer Gewalt wie ein ausgebrochener See in tiefer gelegene Landbezirke oder gegen das Meer hinab. Da der Höhenunterschied meist nicht so bedeutend und die Luft sehr kalt ist, so wird sie beim Niedersteigen nicht merklich erwärmt und langt noch mit großer Kälte in der Tiefe an.

Unter „Scirocco" versteht man einen in den Mittelmeerländern und besonders in Italien häufig auftretenden Wind, der dadurch zustande kommt, dass warme und feuchte Luftmassen durch ausgedehnte Luftströmungen in nördlichere, kältere Gegenden verschleppt und dort condensiert werden. Der gefürchtete sandreiche „Samum" oder Chamsin entsteht, wenn die über der Sahara lagernden heißen Lüfte mit großen Sandmassen gemischt, durch Stürme in die benachbarten Gebiete getragen werden; dabei steigt oft die Temperatur um etwa 50° C.

Eine besonders für den Wechsel der Witterung wichtige Luftbewegung sind endlich die Cyklone und Anticyklone (Fig. 369 a und b). Wie die dauernde Erwärmung der Tropengegenden den Calmengürtel hervorruft,



a Fig. 369. b

in welchem die Luft continuierlich emporströmt und in der Nähe des Äquators einen kleineren Luftdruck hervorruft, so können auch in anderen Gebieten durch längere Zeit alle Bedingungen dafür vorhanden sein, einen andauernden, aufsteigenden Luftstrom mit einem darunter befindlichen Minimum hervorzurufen. Solche Stellen sind in den „synoptischen Karten" dadurch erkenntlich, dass die Isobaren geschlossene Linien bilden, welche einen um so geringeren

Luftdruck zeigen, je näher sie dem Mittelpunkte sind. Man bezeichnet daher jede solche Stelle als ein L u f t d r u c k m i n i m u m oder als eine D e p r e s s i o n. Die vom Umfange gegen das Centrum strömende Luft wird aber durch die Rotation der Erde in der Weise abgelenkt, dass jede Luftströmung gegen das Centrum des Minimums, auf der nördlichen Hemisphäre, vom Erdinnern aus gesehen, im positiven Sinne gedreht wird, und alle diese Ablenkungen führen zu einer Drehung der innersten Luftmassen im Sinne der Pfeile. Die Wirbelbewegung, die sich einstellt, hat also, von oben gesehen, den positiven Drehungssinn. Dieser ganze Bewegungsvorgang spielt sich aber in der Regel nicht dort ab, wo das Minimum entstanden ist, sondern er bewegt sich oft mit großer Geschwindigkeit über ganze Erdtheile hinweg, wobei sich sein Umfang meistens immer mehr erweitert und die Druckdifferenzen sich immer mehr ausgleichen. Es kommt auch vor, dass sich die Wirbelbewegung im Centrum immer mehr steigert und dort zu verheerenden Stürmen anwächst. Derartige Wirbel größeren Umfanges werden als „Tromben“ oder als „Tornados“ bezeichnet, und die sogenannten „Teifune“ kommen zustande, wenn die Wirbelachse bereits länger geworden ist als der Querschnitt des Wirbels.

Viele der über Mitteleuropa hinwegziehenden Cyklonen tauchen im Westen auf und bewegen sich gewöhnlich einer bestimmten Zugstraße entlang gegen Nordosten. Die in der Richtung des Pfeiles fortschreitende

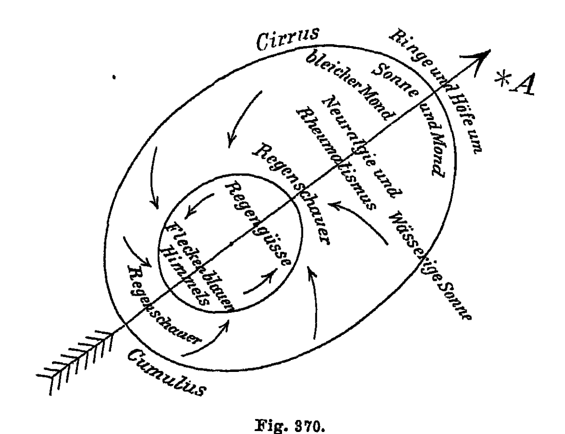


Fig. 370.

Cyklone können wir als einen zusammenhängenden Witterungscomplex auffassen, der den Ort A passiert. Infolgedessen treten an diesem Orte zuerst die sogenannten Schlechtwettervorboten auf, die Höfe und Ringe um Mond und Sonne, das matte Sonnenlicht, neuralgische und rheumatische Schmerzen melden den daran Leidenden einen Witterungsumschlag an, endlich stellen sich vorübergehende Regenschauer und im Centrum selbst Stürme mit schnell wechselnder Windrichtung und kräftige Regengüsse ein. Das Barometer zeigt zugleich das Minimum des Luftdruckes an. Allmälig treten hierauf am Himmel einzelne blaue Flecken auf, und es tritt wieder besseres Wetter ein. Wenn aber die Cyklone inzwischen eine andere Richtung einschlägt, so muss das Fallen des Barometers beim Herannahen der Cyklone nicht unbedingt das schlechte Wetter im Gefolge haben, das zu erwarten war, und man wird daher nur dann mit einiger Wahrscheinlichkeit die dem

Verlaufe der Cyklone entsprechende Wetterfolge voraussagen können, wenn man den Gang derselben und die Veränderungen in ihrer Umgebung schon seit mehreren Tagen verfolgt hat.

Die Anticyklone stellt sich ein, wenn in einem ausgedehnteren Gebiete eine Stauung der Luftströmungen eingetreten ist. Die von einem Minimum ausgehende Cyklone setzt die Entwicklung eines kräftigen Luftstromes von unten nach oben voraus; dieser führt im Inneren derselben alsbald eine Abkühlung und daher die Condensation der vorhandenen Wasserdämpfe herbei; vom Maximum in der Anticyklone geht aber eine Strömung aus, die in den untersten Schichten nach außen und in der Mitte von oben nach unten gerichtet ist. Mit dem Luftdruckmaximum ist also immer eine Temperatursteigerung verbunden, welche jede Condensation verhindert und damit klares Wetter bringt. Die radial nach außen strömende Luft führt infolge der Erdrotation wieder zu einer wirbelartigen Bewegung mit dem entgegengesetzten Drehungssinne, als es bei der Cyklone der Fall war; diese kann sich aber nie zu einer ähnlichen Intensität steigern, wie bei den Tromben, da die Centrifugalkraft, durch die Windrichtung unterstützt, den Wirbel rasch erweitert und damit die Druckdifferenzen ausgleicht.

Nebst der Cyklone und Anticyklone treten in den synoptischen Karten noch mehrere andere charakteristische Isobarenformen auf, die ebenfalls in ihren einzelnen Theilen ganz bestimmte Witterungserscheinungen zeigen. Um daher die Witterungsfolge mit einiger Wahrscheinlichkeit voraussagen zu können, genügt also die Kenntnis des jeweiligen Luftdruckes an Ort und Stelle, wie er am Barometer abgelesen werden kann, keineswegs, es genügt auch noch nicht, wenn man die Barometerstände der ganzen Umgebung kennt, sondern man muss den Verlauf der Isobaren schon seit längerer Zeit verfolgt haben, um die Fortsetzung desselben festzustellen; dabei kann dieselbe noch immer durch unverhoffte Wendungen gestört werden.

Die Feuchtigkeit und ihre Condensationserscheinungen.

Die am Barometer abgelesene Niveaudifferenz gibt nicht den Luftdruck allein, sondern die Summe aus dem Luftdruck und der Spannung der in der Luft vorhandenen Wasserdämpfe an. Wäre die Luft immer mit Wasserdämpfen gesättigt, so müssten wir bei einer Temperatur von

-10^0	0^0	10^0	20^0	30^0 C
2·2	4·6	9·1	17·4	31·5 mm

vom Barometerstande subtrahieren, um den Druck der Luft allein zu erhalten.

Auf das rasche Verschwinden dieser Dampfspannung ist es zurückzuführen, wenn kurz vor dem Eintreten starker Niederschläge wie bei Gewittern das Barometer plötzlich fällt, da in der Umgebung die Condensation schon so weit vorgeschritten ist, dass die Dampfspannung verschwindet. Die fortwährenden Temperaturschwankungen bringen es aber mit sich, dass die in der Luft enthaltene Feuchtigkeit in der Regel nicht den Sättigungsgrad erreicht. Man muss also zugleich die relative Feuchtigkeit in Rechnung ziehen, um den Luftdruck allein feststellen zu können.

Wie wir früher erfahren haben, wird die Erwärmung und die Abkühlung, welche die Druckveränderungen hervorrufen, durch die Feuchtigkeit in der Weise beeinflusst, dass die trockene Luft bei einer Druckzunahme von 1 cm um etwa 1^0 C erwärmt wird, dass aber bei einer gleich

starken Luftverdünnung die Abkühlung kaum zur Geltung kommt, wenn in der mit Feuchtigkeit gesättigten Luft Condensation eintritt. Aufsteigende feuchte Luftschichten werden daher bei eintretender Condensation viel weniger abgekühlt, als die niedersteigenden erwärmt werden und erheben sich auch in viel höhere Regionen als die trockene Luft.

Das Eintreten der Condensation erkennt man zuerst, besonders aus größerer Entfernung, an der Zunahme des diffusen Tageslichtes, sowie an der nebelförmigen Ausscheidung der condensierten Wasserdämpfe. Was wir also an einer Wolke sehen, ist die Oberfläche des Condensationsgebietes. Es kommt z. B. im Sommer sehr häufig vor, dass irgendwo ein feuchter und warmer Luftstrom rasch emporsteigt und dabei in eine viel kältere Luftschichte eindringt. Die condensierten Wasserdämpfe nehmen dann die Form einer Haufenwolke an, die nach unten horizontal scharf abgeschnitten ist, während sie sich oberhalb ballenförmig aufthürmt. Unterhalb der Wolke ist die Luft ebenso reich an Wasserdämpfen, wie in der Wolke selbst, ihre Feuchtigkeit wird aber erst beim Eintritt in die kalte Luftschichte sichtbar. Die ausgeschiedenen Wassertröpfchen sinken vermöge ihres Gewichtes wieder in die tiefere Luftschichte herab, verdunsten hier wieder und werden damit auch unsichtbar. Eine in der Luft schwebende Wolke zeigt uns also nicht so sehr schwebende Wassermassen an, sondern nur ein frei schwebendes Condensationsgebiet.

Die Feuchtigkeit wird auch condensiert, wenn die Luft mit kalten Körpern in Berührung kommt, wie es z. B. der Fall ist, wenn wir in ein ganz trockenes Glas kaltes Wasser gießen. Ist die Luft hinreichend feucht, so wird es sich sofort an der Außenseite mit Thau beschlagen. Ebenso schlägt sich der Thau an den Pflanzen nieder, wenn ihre Temperatur niedriger ist, als diejenige, bei der die feuchte Luft ihre Sättigung erreicht.

Wenn endlich das Wasser im festen Zustande aus der Luft ausgeschieden wird, so bildet es hexagonale Krystalle. Dies ist natürlich nur möglich, wenn die Temperatur unter 0^0 C sinkt, ohne dass früher eine Condensation eingetreten ist, da dieselbe sofort eine Temperatursteigerung herbeigeführt hätte. Bei der Temperatur von 0^0 C darf also die Spannkraft des Wasserdampfes noch nicht 0·46 cm erreicht haben, also auch nicht 5 g Wasser pro m^3 enthalten. Bei einer Temperatur von 10^0 C würde dieser Wassergehalt eine relative Feuchtigkeit von etwa $50^0/_0$ ausmachen, weil dann auf 1 m^3 9·3 g Wasser entfallen, wenn sie mit Wasserdämpfen gesättigt ist. Bei dieser Temperatur muss die Luft noch ziemlich trocken sein, wenn sie zur Reif- oder Schneebildung geeignet sein soll. Hochgradige Feuchtigkeit schützt also an und für sich gegen Reifbildung, und die eingetretene Condensation verhindert sie durch die freigewordene Wärme in noch stärkerem Maße. Das Schneewetter kündigt sich auch meistens in der Weise an, dass sich der Himmel langsam und gleichmäßig mit einem nebeligen Wolkenschleier umzieht, der allmählich dichter wird, bis sich endlich der Schneefall mit gleichzeitiger Temperatursteigerung einstellt.

Wenn die Condensation dadurch zustande kommt, dass sich die Luft beim Aufsteigen verdünnt und daher abkühlt, so wird der größte Theil der Feuchtigkeit schon in den untersten Luftschichten, und zwar zuerst in flüssiger Form ausgeschieden. Für die Reste derselben ist bei relativ größerer Trockenheit noch eine Ausscheidung in Form feiner Eisnadeln möglich, die sich entweder von einem gemeinsamen Krystallisationscentrum ausgehend

zu Schneesternen vereinigen, einzeln herabfallen, oder in trockeneren und wärmeren Schichten wieder verdunsten.

Den fortschreitenden Condensationsstufen entsprechen die verschiedenen Wolkenbildungen. Von diesen können die in den obersten Luftregionen schon der dort herrschenden niederen Temperatur wegen nur aus Eisnadeln bestehen.

Die wichtigsten Wolkenformen sind:

Die weiße, faserige Federnwolke oder Cirrus,
die aus kugelförmigen Theilen zusammengeballte Haufenwolke oder Cumulus,
die niedrige und weitausgedehnte, flache Schichtwolke oder Stratus und
die sich bereits in Regen auflösende Regenwolke oder Nimbus.

Sehr häufig stellen sich auch Zwischenformen ein, wie

der Cirrostratus, ein durchscheinender, gleichmäßig dünner Wolkenschleier, der sich wie die Cirruswolke in einer Höhe von 8000—10000 m einstellt,

der unter dem Namen „Schäfchen" bekannte Cirro-Cumulus in der Höhe von 6000—8000 m,

der Alto-Cumulus, wenn die Schäfchen schon in solcher Größe auftreten, dass sie eine dunkle Schattenseite zeigen, und

der Alto-Stratus, wenn sich die Wölkchen zu einer dichten, grauen, aber hochliegenden Wolkenschichte vereinigen; die letzteren Formationen liegen in einer Höhe von 4000—6000 m.

Der Strato-Cumulus unterscheidet sich von dem Stratus nur dadurch, dass sich die schon geschichteten Wolken noch nicht zu einer einheitlichen Wolkendecke vereinigt haben.

Als Cumulo-Nimbus bezeichnet man die schwere, ballenförmig aufgebaute Gewitterwolke, die sich während des Gewitters in starke Regengüsse auflöst. Sie bewegt sich in einer Höhe von 1000—4000 m, während der tiefliegende Stratus bis etwa 500 m herabsteigt.

Wie das Wasser noch unter 0° C abgekühlt werden kann, ohne zu gefrieren, so kommt es auch oft vor, dass die Feuchtigkeit der Luft den Sättigungspunkt überschreitet, ohne dass die Condensation eintritt; man sagt dann, die Atmosphäre sei „übersättigt". Für das Eintreten der Condensation sind die Staubtheilchen, die sich in der Luft befinden, von großer Wichtigkeit. Da sich dieselben den Wärme- und Lichtstrahlen gegenüber ganz anders verhalten als die feuchte Luft, so wird ihre Temperatur die der Luft bald um eine minimale Differenz übertreffen, bald durch stärkere Ausstrahlung unter dieselbe herabsinken. Im letzteren Falle wird von ihnen die Condensation ausgehen und bei starker Übersättigung sehr rasch fortschreiten. Wenn aber die Temperatur der Staubtheilchen höher ist als die der Luft, so wird der Erfolg derselbe sein, wie wenn die Luft staubfrei wäre, weil dann in der nächsten Umgebung der Staubtheilchen die Sättigung geringer ist. Dadurch wird die Übersättigung so lange begünstigt, bis endlich die Condensation mit desto größerer Heftigkeit zum Durchbruche kommt. Aus optischen Erscheinungen hat man ermittelt, dass die Condensation nicht etwa in Form von Bläschen, sondern immer nur in Gestalt massiver Tröpfchen erfolgt, und zwar mit einem Durchmesser von 0·006 mm in den Wolken bis zu 0·127 mm im Nebel.

Die Menge des gefallenen Regens wird mit dem „Ombrometer" gemessen. Dies besteht aus einem trichterartigen Gefäß, das eine Fläche von etwa

20 dm umfasst. Die Menge des gefallenen Regens drückt man durch die Anzahl mm aus, die das Regenwasser erreichen würde, wenn es dort, wo es hinfällt, liegen bleiben würde ohne abzufließen, zu versickern oder zu verdunsten. Die Menge des gefallenen Schnees wird nach der Wassermenge bemessen, in die er beim Schmelzen übergeht.

Die Angabe der Regenmenge bezieht sich entweder auf einen einzelnen Regen oder auf ein Gewitter, oder man gibt für einen bestimmten Ort die Gesammtmenge des im ganzen Jahre gefallenen Regens, oder endlich den Mittelwert der jährlichen Regenmenge an. So stellten sich z. B. in Fiume im Jahre 1892 während eines 8stündigen außerordentlich starken Regengusses 208 mm ein, und in Chera-Punji in Assam im Juni 1876 in 24 Stunden 1036 mm. Im Durchschnitte beträgt der jährliche Niederschlag in Deutschland 660 mm; in den einzelnen Gebieten Österreichs ist er wegen des Einflusses der Alpen ziemlich verschieden. In Bishop Creek in Kalifornien ist der jährliche Niederschlag nur 33 mm, im schon erwähnten Chera-Punji 14800 mm.

Die „Graupeln" kommen dadurch zustande, dass die Schneeflocken beim Niederstürzen durch wärmere Luftschichten fallen, an der Oberfläche vorübergehend schmelzen und sich dann mit einer Eiskruste überziehen. Der Hagel tritt fast nur in Verbindung mit starken Gewittern auf.

Die atmosphärische Elektricität. Um die an verschiedenen Punkten der Atmosphäre herrschenden elektrischen Spannungen miteinander zu vergleichen, benützt man mit Vortheil eine brennende Kerze, deren Flamme durch einen Draht mit einem Elektroskope in Verbindung gebracht wird, welches zuerst das Potential des Erdbodens besitzt. Aus den umfangreichen Beobachtungen, welche besonders F. Exner mit einem solchen Apparate an sehr vielen Orten der Erde und unter den verschiedensten Verhältnissen gemacht hat, ergibt sich, dass das Potentialgefälle vom Erdboden gegen die wolkenfreie Luft, also der in Volt gemessene Spannungsunterschied bei einer Höhendifferenz von einem Meter durchschnittlich 130 Volt beträgt; wir können daher auf eine ziemlich starke negative Ladung der Erde im Vergleiche zu den höheren Luftschichten schließen. Das durchschnittliche Potentialgefälle nimmt gegen den Äquator hin ab und gegen die Pole zu. Während es sich an einem besimmten Orte im Laufe des Tages bei ruhigem Wetter wenig ändert, kann es in den einzelnen Jahreszeiten sehr verschiedene Werte annehmen und schwankt oft zwischen 100 und 500 Volt pro m. Das Potentialgefälle nimmt aber sofort rasch zu, sobald sich Wolken am Himmel zeigen, und kann bei herannahenden Gewittern bis über 8000 Volt pro m ansteigen. Es ist daher begreiflich, dass zwischen verschieden geladenen Wolken bei einer derartigen Steigerung des Potentialgefälles dasselbe zu kräftigen Entladungen führen kann; gleichwohl steht die Länge der Blitze im Vergleiche zur Funkenlänge künstlicher Entladungen noch immer in einem Verhältnisse, das nach Tausenden zählt. Entladungen treten sowohl zwischen verschiedenen Wolken, wie auch zwischen diesen und der Erde ein. Insbesondere sprechen die im Innern der Hagelwolken auftretenden häufigen Entladungen für starke Spannungsunterschiede in den einzelnen Theilen derselben. Die auf die Erde fallenden Blitze zeichnen sich oft sowohl durch die intensiven calorischen Wirkungen, wie auch durch die Kraft aus, die sie bei mechanischen Zerstörungen entfalten. Die Wege, welche die Blitze nehmen, wie auch ihre Wirkungen sind oft so sonderbar und unerklärlich, dass sie sich nicht leicht nach allgemeineren Gesichtspunkten behandeln lassen. Der in Verbindung mit dem Blitze auftretende Donner beweist, dass jede solche elektrische Entladung mit einer starken Lufterschütterung verbunden ist. In der nächsten Umgebung des Blitzes macht der Donner den Eindruck einer kräftigen Explosion mit einem einmaligen Knall, während erst in größeren Entfernungen die wiederholten Reflexionen und Brechungen der Schallwellen in der Luft das charakteristische Rollen des Donners hervorrufen. Das sogenannte Wetterleuchten, welches sich in klaren Sommernächten oft über einen großen Theil des Himmels ausbreitet, entsteht dadurch, dass die Blitze sehr entfernter Gewitter in hohen Luftschichten total reflectiert werden.

Selten kommen Gewitter im Winter vor. Die meisten Gewitter entstehen, wenn die über dem heißen Erdboden ausgebreitete, reichlich mit Feuchtigkeit übersättigte, schwüle Luft von kälteren Luftschichten überlagert und das labile Gleichgewicht endlich gestört wird; die plötzlich emporsteigenden wasserreichen Luftmassen rufen eine rapid fortschreitende Wolkenbildung hervor, womit auch eine starke Elektricitätserregung verbunden ist. Für die Geschwindigkeit aller dieser Vorgänge spricht insbesonders die Art der Condensation, die nicht nur kräftige Regengüsse mit ungewöhnlich

großen Tropfen bewirkt, sondern auch zur Hagelbildung führt. Die Hagelkörner sind massive Eisstücke, mit schalenartiger oder strahliger und theilweise auch krystallinischer Structur. Sie kommen in den verschiedensten Größen vor und erreichen nicht selten die Größe von Taubeneiern; es wurden schon Hagelsteine vorgefunden, deren Gewicht nahezu ein kg betrug. Der Hagelschlag erstreckt sich häufig auf relativ engbegrenzte, strichförmige Gebiete. Die ausgesprochen kugelige Form der Hagelkörner lässt vermuthen, dass die condensierten Wassermengen zuerst stark unterkühlt werden und dann rasch gefrieren; die abnormen Größen lassen immerhin auf ein längeres Verweilen in der Luft schließen, wie ja auch die starke Abkühlung ein Herabstürzen aus höheren Luftschichten voraussetzt.

Die Gewitterbildungen sind häufig rein localer Natur oder sie pflanzen sich mit einer Geschwindigkeit von mehr als 100 km pro Stunde über große Ländergebiete fort.

Meteorologische Optik.

Bevor die von den Gestirnen kommenden Strahlen in unser Auge gelangen, müssen sie die Atmosphäre durchsetzen und werden, wenn sie nicht senkrecht auffallen, zum Lothe gebrochen, und zwar umsomehr, je dichter die Luft in den tiefer liegenden Schichten ist. Den Stern S (Fig. 371)

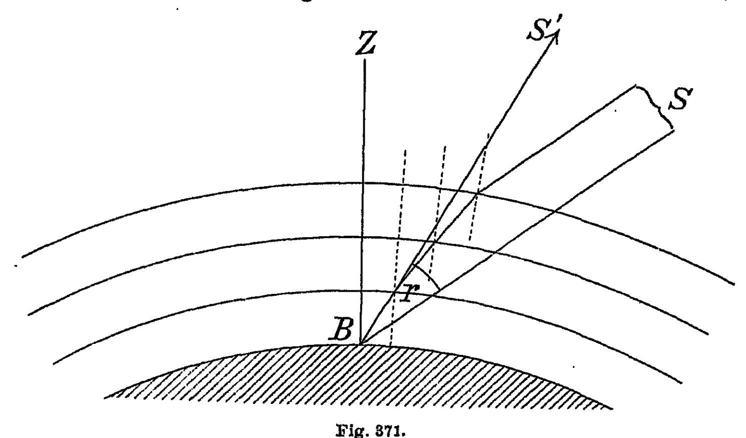


Fig. 371.

würden wir ohne die Atmosphäre in der Richtung BS erblicken; bestünde die Atmosphäre aus drei homogenen Schichten von verschiedener Dichte, so würden die Strahlen nach dreimaliger Brechung in der Richtung $S'B$ das Auge des Beobachters treffen. Die Zenithdistanz des Sternes scheint daher ZBS' zu sein, während sie ohne die Atmosphäre ZBS, also etwas größer wäre. Den Winkel SBS', um welchen die Zenithdistanz infolge der allmählichen Verdichtung der Luft vermindert erscheint, bezeichnet man als die atmosphärische Refraction. Dieses Brechungsphänomen war schon dem Astronomen Kleomedes zur Zeit des Augustus bekannt, und er brachte es bereits mit der Erscheinung in Verbindung, dass man einen Ring am Boden eines Gefäßes dadurch sichtbar machen kann, dass man in das Gefäß Wasser hineingießt. Tycho Brahe wusste bereits, dass dieser Winkel am Horizonte, also die sogenannte Horizontalrefraction, 34' betrage. Bei einer Zenithdistanz

von	10°	45°	80°	85°	88°	90°
beträgt sie	10″	58″	5′16′	9′46″	18′9″	34′54″.

In geringem Grade hängt die Refraction auch vom Barometerstande, von der Feuchtigkeit und von der Temperatur ab.

Da der Refractionswinkel größer ist als der scheinbare Durchmesser des Mondes von 31′5″ und als der der Sonne, der höchstens 32′35″ erreicht, so sehen wir in einer Ebene diese beiden Gestirne noch immer in ihrem ganzen Umfange, wenn sie ohne die Refractionserscheinung bereits vollständig untergegangen wären. Diese Erscheinung ist besonders für die Polargegenden von großem Vortheil, weil dadurch das Gebiet, in welchem die Sonne im Winter gar nicht aufgeht, sehr verkürzt wird.

Eine andere von der Luft ausgehende Refractionserscheinung besteht darin, dass die Strahlen auch durch einen aufsteigenden, warmen Luftstrom aus ihrer Richtung abgelenkt werden. Blickt man über ein größeres Feuer hinweg nach einem im Hintergrunde befindlichen Gegenstande, so bemerkt man, wie die Contouren der Objecte zitternd auf- und niedersteigen, da die den heißen Luftstrom durchdringenden Lichtstrahlen beim Flackern des Feuers bald nach der einen, bald nach der anderen Seite von ihrer Richtung abgelenkt werden. Daher kommt es auch, dass die von scheinbar punktförmigen Objecten, also z. B. die von den Fixsternen ausgehenden Strahlen auf verschieden langen Wegen in unser Auge gelangen und deshalb die Wellen manchmal mit entgegengesetzter Phase zusammentreffen. Das ist nach Arago die Ursache des Funkelns der Fixsterne (Scintillieren). Die näheren Planeten haben bereits einen so großen scheinbaren Durchmesser, dass von der einen oder von der anderen Stelle desselben immer noch Licht ins Auge gelangt, und daher die Lichtwirkung nie vollständig unterbrochen wird. Ihr Licht ist daher ein viel ruhigeres als das der Fixsterne. Das Funkeln nimmt gegen den Äquator hin bedeutend ab, da dort die Luft weniger bewegt ist, als in höheren Breiten.

Die Reflexion des Lichtes in der Luft. Das Licht kann durch die Luft in derselben Weise wie in einem Spiegel oder diffus reflectiert werden. Die diffuse Reflexion wird durch die außerordentlich feinen Staubtheilchen, sowie auch durch die kleinsten condensierten Wassertröpfchen und Eiskrystalle veranlasst. Eigentliche Spiegelungen kommen nur zustande, wenn die Lichtstrahlen unter einem sehr großen Einfallswinkel auf die ebene Begrenzungsfläche einer dünneren Luftschichte fallen und an derselben total reflectiert werden. Dies tritt zuweilen in ausgedehnten sandigen Gegenden ein, wenn bei Tagesanbruch der Boden rasch und gleichmäßig erwärmt wird und die leichtere Luft an keiner Stelle die kälteren Schichten durchbricht. Dann kommt an der Grenzfläche beider Luftschichten die totale Reflexion zustande und bewirkt eine Spiegelung wie an einer glatten Wasserfläche.

Manchmal tritt die Luftspiegelung in der Weise auf, dass Gegenstände an einer hoch über dem Beobachter liegenden dünneren Luftschichte reflectiert werden. Dabei zeigen sich oft die Spiegelbilder so ferner Gegenstände, dass dieselben schon wegen der Krümmung der Erdoberfläche nicht direct sichtbar wären. Infolge einer ähnlichen Spiegelung erhalten die in hohen Schichten gebrochenen Sonnenstrahlen beim Auf- und Untergange eine Richtung, dass sie die Atmosphäre nicht wieder verlassen, sondern nach Stellen der Erdoberfläche fallen, welche die directen Sonnenstrahlen noch lange Zeit nicht erreichen oder schon längst verlassen haben. Diese über einen großen Theil des Abendhimmels sich erstreckenden Reflexionen sind es hauptsächlich, die in den Alpengegenden die Erscheinungen des „Alpenglühens“ hervorrufen. Nach Sonnenuntergang hüllen sich oft besonders die höheren Dolomitblöcke in eine bleigraue Farbe, die erst durch den von Westen herannahenden Lichtreflex allmählich

wieder verdrängt wird, und dann steigert sich bei klarem Himmel die Beleuchtung bis zur gleichen Stärke, wie sie durch die Sonne selbst hervorgebracht wurde, nur treten jetzt die Schatten der Gebirgsklüfte nicht mehr so scharf hervor wie früher, weil die Beleuchtung nicht von einer engbegrenzten Lichtquelle, sondern von einer ausgedehnten Fläche ausgeht.

Die Dämmerung. Dass der Himmel am Tage nicht eben so dunkel erscheint wie bei Nacht und die Sterne trotz der Sonnenstrahlung deutlich hervortreten, ist eine Folge der diffusen Reflexion. Thatsächlich erscheint auch den Luftschiffern, wenn sie in sehr hohe Luftschichten empordringen, der Himmel immer dunkler, obwohl die Sonnenstrahlung immer kräftiger wird. Aber nicht alle Strahlenarten sind der diffusen Reflexion gleich stark unterworfen, und zwar sind es nach Lord Rayleigh besonders die blauen Strahlen, welche durch die diffuse Reflexion zu uns gelangen und daher die blaue Farbe des Himmels hervorrufen. Wäre die allerdings intensiv blaue Farbe der flüssigen Luft die Ursache der blauen Färbung des Himmels, so müssten auch Sonne und Mond, besonders beim Auf- und Untergange, wenn die dazwischen liegende Luftschichte am stärksten ist, blau gefärbt erscheinen. Aber gerade in dieser Sonnenstellung treten besonders bei großer Feuchtigkeit die rothen Strahlen in den Vordergrund und bewirken bei fortschreitender Condensation das Morgen- und Abendroth.

Der klare, wolkenfreie Himmel zeigt sehr verschiedene Helligkeitsstufen. Schon auf alten Gemälden findet man die Naturerscheinung richtig wiedergegeben, dass der Himmel am Horizonte heller ist als in höheren Lagen. Wenn man in unseren Breiten die Helligkeit an dem der Sonne gegenüber liegenden Punkte des Horizontes gleich 1 setzt, während z. B. die Zenithdistanz derselben 46° beträgt, so nimmt die Helligkeit längs des Horizontes in der Richtung gegen die Sonne zu, bis sie unterhalb derselben 4·7 erreicht; dann nimmt sie in der Richtung gegen die Sonne nach oben hin etwas ab und steigt hierauf wieder, bis in der unmittelbaren Nähe der Sonne, wo sie die Intensität 24 erreicht. Bewegen wir uns von hier aus in einem größten Kugelkreise gegen den Zenith und noch 25° über denselben hinaus, so erreichen wir den dunkelsten Punkt am Himmel, wo die Helligkeit nur 0·1 beträgt, also 240 mal schwächer ist als in der Nähe der Sonne. Das diffuse Sonnenlicht ist ferner an den meisten Stellen polarisiert, nur etwa 20° oberhalb und unterhalb der Sonne und 20° oberhalb des Gegenpunktes der Sonne zeigt es keine Polarisation. Wenn sich Wolken am Himmel befinden, so wird dadurch die Lichtvertheilung wesentlich verändert und hängt hauptsächlich von der Höhe derselben ab.

Die über den ganzen Himmel ausgebreitete Helligkeit dauert noch längere Zeit nach dem Untergange der Sonne an und tritt schon vor dem Aufgange derselben ein. Man unterscheidet eine bürgerliche Dämmerung, die so lange andauert, als man eine gewöhnliche Druckschrift ohne Anstrengung im Freien lesen kann, und eine astronomische Dämmerung, welche sich bis zu jenem Zeitpunkte erstreckt, wann die Stelle, unterhalb welcher sich die Sonne befindet, nicht mehr erkenntlich ist und die Sterne sechster Größe sichtbar werden. Erstere hört auf, wenn sich die Sonne etwa 7°, letztere, wenn sie gegen 18° unter den Horizont hinabgesunken ist. Die Länge der Dämmerung hängt sehr stark von dem Winkel ab, unter dem die tägliche Sonnenbahn den Horizont schneidet, und ist daher viel kürzer in den Tropen, wo sie oft fast in verticaler Richtung auf- und untergeht, als in der gemäßigten und kalten Zone. Während am Äquator der Tag durch die Dämmerung kaum um 3 Stunden verlängert wird, bewirkt sie am 70. Breitegrad eine Verlängerung um etwa 11 Stunden.

Ringe und Höfe um Sonne und Mond. Diese beiden Erscheinungen treten in der Atmosphäre auf, wenn die Condensation in Gestalt kleiner Tröpfchen oder Eisnadeln bereits eingetreten, aber noch nicht über eine gewisse Grenze hinaus vorgeschritten

ist. Hat sich um den Mond ein Hof ausgebildet, so befindet sich der Mond in der Mitte eines bläulich glänzenden Feldes, das von einem kreisförmigen röthlich-gelben oder röthlich-braunen Saume umgeben ist. An diesem rothen Saume schließen sich manchmal ein blauer, dann ein grüner, hierauf ein blassgelber und oft noch ein zweiter rother und nach einer ähnlichen Farbenfolge auch noch ein dritter rother Ring an. Der Umfang dieser Ringe kann sehr verschieden sein; häufig schließt die Farbenfolge schon mit dem ersten, meistens aber mit dem zweiten Roth ab. Fraunhofer suchte diese Naturerscheinung dadurch künstlich nachzuahmen, dass er eine große Anzahl kleiner Glaskügelchen auf einer Glasscheibe anbrachte und durch ein Fernrohr betrachtete. So erhielt er wirklich ein ähnliches Beugungsbild. Diese Beugungserscheinung kann man auf sehr einfache Weise auch hervorrufen, indem man in einem dunklen Zimmer eine gewöhnliche Glasscheibe gegen ein Kerzenlicht hält und aus einiger Entfernung anhaucht. Dabei kann man sogar beobachten, wie dieser Hof zuerst mit einem ziemlich großen Umfang auftritt und schon während des Hauchens, also bei fortschreitender Condensation rasch kleiner wird. Damit haben wir auch den Grund gefunden, warum die Höfe mit Recht als Schlechtwetterboten betrachtet werden. Das Auftreten eines Hofes ist nämlich das Zeichen der beginnenden Condensation, und das Zusammenschrumpfen deutet an, dass dieselbe immer mehr fortschreitet. Wie wir in der Optik aus der Breite und Entfernung der Spalten eines Beugungsgitters auf die Wellenlänge geschlossen haben, so kann man auch aus der Größe des Hofes und seiner Farbenvertheilung die Größe der Tröpfchen berechnen, welche an gewissen Stellen die genannten Farbentöne hervorrufen. Newton beschreibt einen solchen Hof, den er im Jahre 1692 beobachtete, bei welchem sich das erste Roth in einer Entfernung von 2° 33′, das zweite in der Entfernung von 4° 40′ und das dritte in der Entfernung von etwa 6° einstellte, und daraus ergibt sich übereinstimmend für den Durchmesser der Tröpfchen ein Wert von 0·015 mm.

Die viel prächtiger gefärbten Höfe in der Umgebung der Sonne werden seltener bemerkt, weil wir sie wegen des blendenden Sonnenlichtes weniger beobachten können.

Einen ganz anderen Charakter zeigen die Ringe, die wegen ihrer größeren Helligkeit bei der Sonne leichter sichtbar sind. Die Ringe, seien sie färbig oder weiß, haben der Sonne gegenüber immer eine bestimmte Lage; der farblose Horizontalkreis geht durch die Sonne hindurch und hat die Zenithlinie zur Symmetrieachse. Ein zweiter, allerdings selten sichtbarer Ring, der Verticalkreis, geht in verticaler Richtung von der Sonne aus. Um die Sonne als Mittelpunkt zieht sich ein erster Kreis in der Entfernung von etwa 22°, ein zweiter in der Entfernung von 45° und manchmal noch ein dritter in der Entfernung von 90°. Der erste und zweite sind färbig und kehren der Sonne den rothen Rand zu. Sie unterscheiden sich von den Höfen hauptsächlich dadurch, dass sie gegen die Sonne zu scharf abgegrenzt sind und immer dieselbe Breite von etwa 1°, beziehungsweise 3° haben. Wo sich die verschiedenen Kreise durchschneiden, treten die sogenannten „Nebensonnen“ auf, da hier die Lichtwirkung gesteigert wird. Mit seltener Pracht trat diese Erscheinung am 20. Februar 1661 in Danzig auf und wird daher als das „Danziger Phänomen“ bezeichnet. (Fig. 372.) Die färbigen Ringe kommen immer durch Brechung zustande, die weißen Ringe aber nur durch Reflexion an den Eisnadeln, welche in großen Mengen in verticaler Stellung herabfallen, weil sie dabei durch die Luft einen geringeren Widerstand erfahren. Um die Entstehung des Horizontalkreises zu erklären, brauchen wir uns nur das Bild zu vergegenwärtigen, das wir erhalten würden, wenn wir uns in die hinterste Ecke eines Winkelspiegels stellen und in den verticalen Spiegelwänden die sich zu einem Kreise aneinanderschließenden Sonnenbilder betrachten. Diese zur Entstehung des Horizontalkreises nöthigen Winkelspiegel liefern die Mantelflächen der auf allen Seiten in unendlicher Anzahl herabfallenden Eisprismen. Die übrigen Ringe geben uns ebenfalls an, aus welchen Richtungen die von der Sonne ausgehenden Strahlen mit oder ohne Brechung, im letzteren Falle durch bloße Reflexion in unser Auge gelangen.

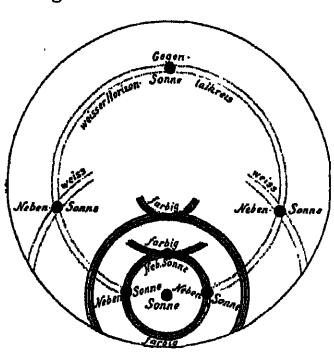


Fig. 372.

Der Regenbogen ist eine Interferenzerscheinung, welche die Wassertröpfchen in der Luft durch Brechung und Reflexion der Sonnenstrahlen

hervorrufen. Seine Stellung ist immer eine solche, dass die von der Sonne aus durch das Auge des Beobachters gezogene Gerade die Symmetrieachse des Regenbogens bildet. Er erscheint daher am Abend nur im Osten und bildet einen langgestreckten niederen Bogen, wenn die Sonne noch hoch am Himmel steht, und steigt um so höher, je mehr sich die Sonne dem Horizonte nähert. Sehr oft tritt er nach rasch vorübergehenden Gewittern auf, wenn sich die im Osten aufgeschichteten Wolken im letzten Stadium der Condensation befinden, während sich das Wetter im Westen bereits wieder geklärt hat und die Sonnenstrahlen ungeschwächt die unzähligen Tröpfchen treffen, die noch die Luft östlich vom Beschauer erfüllen. Wenn das Phänomen unter den günstigsten Bedingungen sich entwickeln und vollständig ausbilden kann, so erhalten wir ungefähr folgendes Bild. Vom blendend weißen Hintergrunde hebt sich nahezu plastisch ein röthlich-graues Band ab, das eine Breite von etwa 25 Sonnendurchmessern besitzt. Am äußeren und inneren Rande ist es mit gesättigten Farben umsäumt, die auf den ersten Blick an die Spectralfarben erinnern (Fig. 373).

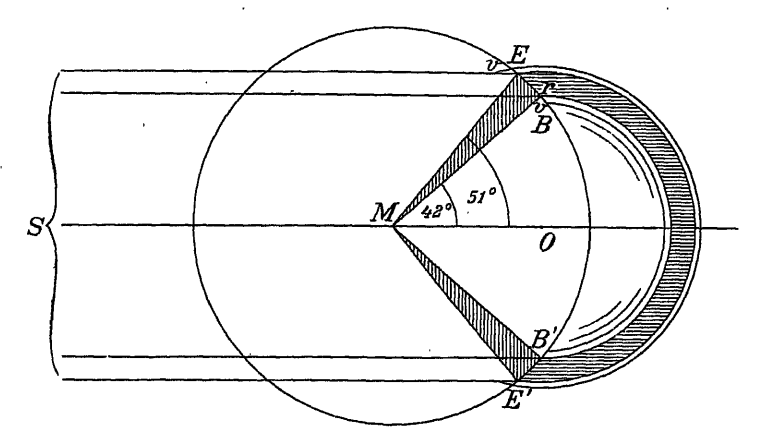


Fig. 373.

Die beiden färbigen Ränder kehren sich die rothe Seite zu und laufen in einen blauen oder violetten Farbenton aus, an den sich auf der hohlen Seite noch mehrere Bruchtheile concentrischer Farbenringe anschließen, welche häufig einen mehrmaligen Wechsel von Roth und Grün zeigen. Beim Regenbogen ist aber nicht immer, wie beim Spectrum die gelbe Farbe die am stärksten leuchtende, sondern auch im Orange, Grün und selbst im Violett kann die kräftigste Lichtwirkung liegen. Den lichtkräftigen inneren Farbenrand BB' bezeichnet man als den Hauptregenbogen. Den äußeren Farbenrand EE' nennt man Nebenregenbogen und die innerhalb des Hauptregenbogens auftretenden färbigen Bogenstücke secundäre Regenbogen. Sehr oft kommt es vor, dass nur der Hauptregenbogen und auch dieser mit so geringer Leuchtkraft zustande kommt, dass der Hintergrund durch das einfach rothgrüne Farbenband kaum verdeckt wird. Die Aufeinanderfolge der fast nie sichtbaren „sieben Regenbogenfarben“ entspricht nur oberflächlich betrachtet der Farbenfolge im Spectrum und unterscheidet sich von derselben hauptsächlich durch die veränderliche Breite der einzelnen Farbentöne.

Eine ähnliche Erscheinung ist der viel blässere Regenbogen, welchen das Mondlicht hervorruft. Der „weiße Regenbogen“, welcher von der Sonne auf stark condensierten, nahen Nebeln erzeugt wird, enthält die Farben so gleichmäßig gemischt, dass die einzelnen Lichtarten schwer zu unterscheiden sind; man bezeichnet ihn besser als Nebelbogen. In etwas veränderter Form kann man den Regenbogen bei jedem Springbrunnen beobachten, dessen Wasserstrahl stark zerstreut wird. Um in die Entstehungsweise des Regenbogens einen Einblick zu gewinnen, wollen wir überlegen, wie die Wellenfläche der von der Sonne ausgehenden Strahlen durch einen kugelförmigen Wassertropfen verändert wird. Die Wellenfläche der Sonne ist allerdings nicht im strengen Sinne des Wortes eben; denn die von den Rändern der Sonne kommenden Strahlen haben eine etwas andere Richtung als die von der Mitte ausgehenden, letztere kommen aber am stärksten zur Geltung. Das Resultat wird also nicht wesentlich verändert, wenn wir statt der vollen Sonnenscheibe nur eine punktförmige Lichtquelle annehmen. Die gegen den Mittelpunkt O (Fig. 374) des Tropfens gerichteten Strahlen gehen in gerader

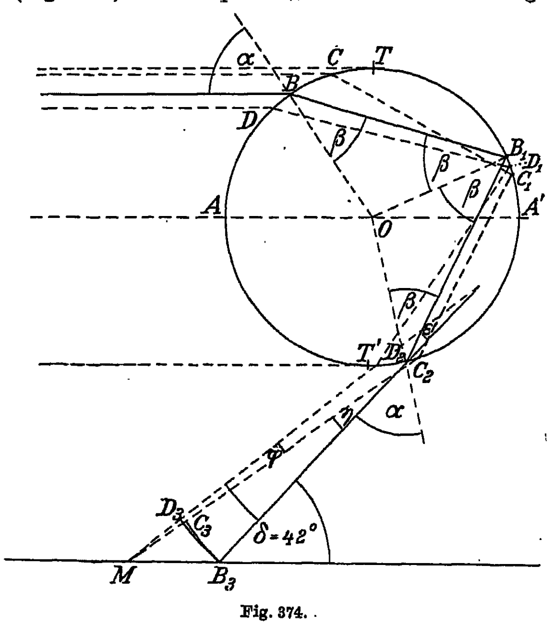


Fig. 374.

Linie durch den ganzen Tropfen hindurch, soweit sie nicht an der vorderen und rückwärtigen Seite theilweise reflectiert werden. Während aber die Reflexion an der vorderen Tropfenoberfläche bei A stark divergierende Strahlen hervorruft, führt die Reflexion an der rückwärtigen Kugelfläche bei A' zu Strahlen, die mit relativ breiter Wellenfläche ungefähr in derselben Richtung zurückgeworfen werden. Daher kommt es, dass wir auf einer bethauten Wiese im Sonnenscheine den Schatten unseres Kopfes von einem Kreise diffusen Lichtes umgeben sehen, da die in der nächsten Umgebung seines Schattens liegenden Tröpfchen den Augen die meisten reflectierten Lichtstrahlen zuzusenden vermögen.

Die in der Nähe von T und T' auffallenden Strahlen erzeugen nur diffuses Licht. Längs eines gewissen Bogens zwischen A und T einerseits und A und T' andererseits

seits dringen die Strahlen in den Tropfen ein, werden dabei gebrochen und verlassen ihn als färbige Strahlen. Nehmen wir zunächst an, das in den Tropfen eintretende Licht sei homogen und ein dünner Strahl, der bei B in den Tropfen eindringt, gelange zum Punkte B_1, werde hier reflectiert und zwischen den Punkten C_2 und D_2 abermals gebrochen. Bei der Brechung eines Strahles durch ein Prisma haben wir gezeigt, dass die Deviation der Strahlen ein Minimum ist, wenn der Strahlengang symmetrisch verläuft. Wir mögen also von dieser Lage aus das Prisma nach der einen oder nach der anderen Seite drehen, der Deviationswinkel nimmt immer zu. Da hier der Einfallswinkel eines Strahles um so größer wird, je näher der Punkt B bei T liegt, so werden die gebrochenen Strahlen sehr verschiedene Wege einschlagen, und einer von diesen — es sei der bei B auffallende — wird wieder am wenigsten abgelenkt. Der Strahl $DD_1D_2D_3$ bildet aber beim Austreten in der Richtung D_2D_3 mit dem Strahle B einen kleineren Winkel ε als der Strahl C_2C_3, nämlich η. Wir erhalten demnach für die zu beiden Seiten von B_3 auffallenden Strahlen zweierlei Wellenflächen B_3C_3 und B_3D_3, die miteinander einen sehr kleinen Winkel einschließen. Wenn sich aber zwei Wellenflächen unter einem sehr kleinen Winkel schneiden, so tritt Interferenz ein und wir erhalten an der beleuchteten Stelle, wenn das Licht homogen ist, abwechselnd helle und dunkle Streifen. Wir müssen also den Winkel δ für jenen Punkt B_3 zu bestimmen suchen, in dessen Umgebung die Strahlen die geringste Drehung erfahren. Nur nach einer solchen Stelle kommen die Strahlen mit einer hinreichend ausgedehnten Wellenfläche an, um eine deutlich sichtbare, interferierende Doppelwelle hervorzurufen. In dieser Richtung werden wir die erste helle Stelle im Tropfen sehen, und an dieselbe schließen sich dann die Interferenzstreifen an.

Um die Lage dieses Strahles zu finden, gehen wir vom Brechungsgesetze aus: $\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n = \frac{4}{3}$, wobei n der Brechungsindex des Wassers für die zwischen Roth und Orange liegenden Strahlen bedeutet. Diese Gleichung muss auch für die zunächst benachbarten Strahlen C_2C_3 und D_2D_3 gelten, ohne dass sich deshalb der abgelenkte Strahl von B_3 weiter entfernt.

Aus $\sin\alpha = n\sin\beta$ und $\sin(\alpha + x) = n\sin(\beta + y)$ folgt zunächst

$$\sin(\alpha + x) - \sin\alpha = n\left[\sin(\beta + y) - \sin\beta\right]. \text{ Wenn wir in der Gleichung}$$

$$\sin\alpha\cos x + \cos\alpha\sin x - \sin\alpha = n\left[\sin\beta\cos y + \cos\beta\sin y - \sin\beta\right]$$

für den Fall, dass x und y sehr kleine Winkel sind, also $\cos x$ und $\cos y$ nahezu gleich 1 und $\frac{\sin x}{\sin y} = \frac{x}{y}$, diese Werte dafür einsetzen, so bekommen wir $x\cos\alpha = n\,y\cos\beta$.

Es ist ferner, wie sich aus Fig. 375 ergibt, $\delta = 2\,(2\beta - \alpha)$ und zugleich soll die Gleichung bestehen

$$\delta = 2\left[2(\beta + y) - (\alpha + x)\right], \text{ mithin muss } 2y = x \text{ und } 2y\cos\alpha = n\,y\cos\beta.$$

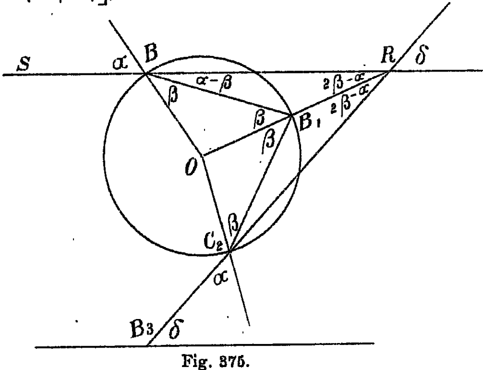


Fig. 375.

Für die Winkel α und β bestehen also die trigonometrischen Gleichungen

$$2\cos\alpha = n\cos\beta \text{ und } \sin\alpha = n\sin\beta.$$

Aus $4\cos^2\alpha = n^2\cos^2\beta$ und $4\,(1 - \sin^2\alpha) = n^2 - n^2\sin^2\beta = n^2 - \sin^2\alpha$ folgt

$$4 - n^2 = 3\sin^2\alpha; \text{ es ist also } \sin\alpha = \sqrt{\frac{4 - n^2}{3}} \text{ und für } n = \frac{4}{3},$$

$$\alpha = 59^0\ 23{\cdot}5',\ \beta = 40^0\ 12{\cdot}2' \text{ und } \delta = 4\beta - 2\alpha = 42^0\ 2'.$$

Die auf den Tropfen fallenden Strahlen können aber auch den Weg $E E_1 E_2 E_3 E_4$ einschlagen (Fig. 376). Dann ist der Winkel $E O E_3 = 6\beta - 2R$ und

$$\delta = 2\alpha - (6\beta - 2R) = 2[\alpha - 3\beta + R] = 2\left[(\alpha + x) - 3(\beta + y) + R\right],$$

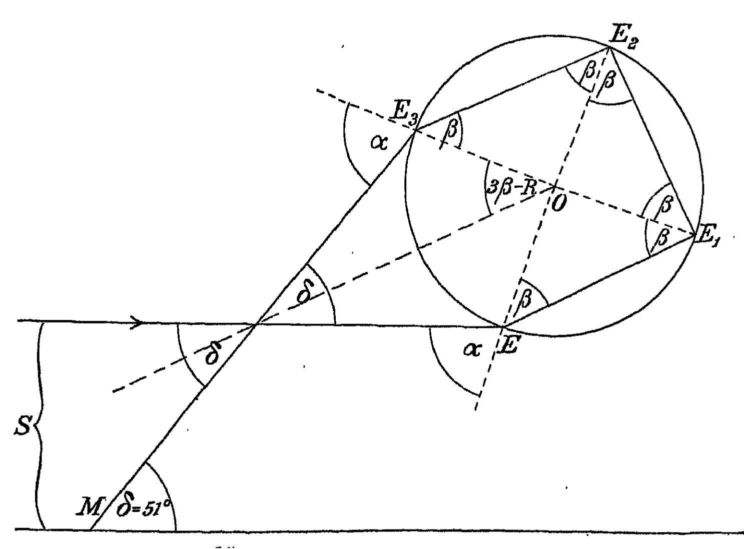


Fig. 376.

also muss $x = 3y$ und $3y\cos\alpha = ny\cos\beta$ oder $3\cos\alpha = n\cos\beta$. Aus $9\cos^2\alpha = n^2\cos^2\beta$ und $9 - 9\sin^2\alpha = n^2 - n^2\sin^2\beta = n^2 - \sin^2\alpha$ folgt $9 - n^2 = 8\sin^2\alpha$ und $\sin\alpha = \sqrt{\frac{9 - n^2}{8}}$;

für $n = \frac{4}{3}$ ergibt sich also $\alpha = 71^0\,50'$, $\beta = 45^0\,27'$ und $\delta = 50^0\,58'$.

Durch noch öfter sich wiederholende Reflexionen im Inneren des Tropfens entstehen nur mehr Wellenstrahlen, die theils zu lichtschwach, theils zu ungünstig gelegen sind, als dass man sie leicht beobachten könnte.

Unter den von der Sonne S kommenden Strahlen (Fig. 374 und Fig. 376) gelangen nur diejenigen nach M, welche in den Punkten B und E gebrochen und dann reflectiert wurden. Von den Richtungen zwischen den Winkeln von 42^0 und 51^0 gelangen keine Strahlen zu uns, welche eine hinreichend starke Lichtempfindung hervorbringen könnten. Daher erscheint uns der Raum zwischen EM und BM (Fig. 373) relativ dunkel. Von den außerhalb liegenden Tropfen kommt wenigstens diffus reflectiertes Licht in unser Auge, und daher erscheint die äußere Umgebung heller. Die von uns berechneten Werte von δ gelten aber nur für jene Strahlen, die zwischen Roth und Orange liegen, weil sie gerade den Brechungsindex $n = 4:3$ haben. Wir würden eine Reihe anderer Werte erhalten haben, wenn wir für alle wichtigeren Farbentöne den Brechungsindex eingeführt hätten. Die entstehenden hellen und dunklen Linien haben für jede Farbe eine andere Breite und geben daher ein sehr compliciertes Bild von Mischfarben, von denen nur die ersten annähernd der Reihenfolge der Spectralfarben entsprechen, weil die ersten Maxima der Lichtstärken ungefähr in derselben Reihenfolge auftreten. (Fig. 377 b.)

Denken wir uns die Fig. 374 noch einmal, aber in einem etwas vergrößerten oder verkleinerten Maßstabe gezeichnet, so werden sich, wie bei

ähnlichen Dreiecken, die Winkel nicht ändern, wohl aber alle Strecken proportional größer oder kleiner werden. Die Differenz der Weglängen für die Strahlen $CC_1 C_2 M$ und $DD_1 D_2 M$ wird in diesem Falle entsprechend länger oder kürzer werden. Mithin werden die Interferenzstreifen in anderen Entfernungen auftreten, wenn der Tropfen, welcher die Phasendifferenzen hervorgerufen hat, etwas größer oder kleiner wird. Es wird also auch die Größe der Tropfen auf die Breite der Interferenzstreifen, auf die Intensitätsverhältnisse und daher auch auf die Entstehung der Mischfarben einen wesentlichen Einfluss haben. Fig. 377a zeigt, wie die Lichtintensitäten der

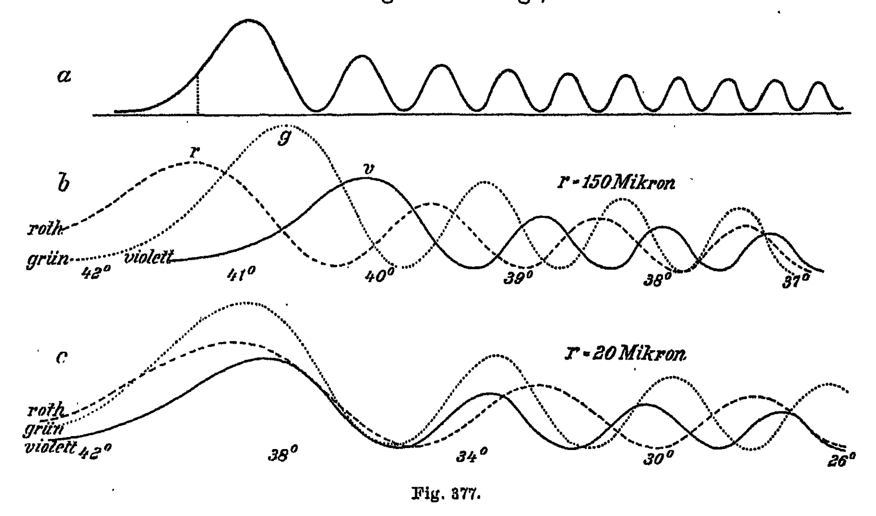


Fig. 377.

Interferenzstreifen bei homogenem Lichte vertheilt sind und besonders dass das erste Intensitätsmaximum das stärkste ist. Aus Fig. 377b ersieht man, wie für die rothen (- - -), grünen (·········) und violetten (———) Strahlen die Maxima der sich überlagernden Interferenzstreifen bei einem Tropfenradius von $r = 0{\cdot}15$ mm weit auseinandertreten und daher viel gesättigtere Farben geben müssen als bei einem Tropfenradius von 0·2 mm (Fig. 377 c). Die Färbung wird demnach blässer, wenn die Größe der Tropfen zunimmt. Nebelschichten, deren Condensation bereits zu ziemlich großen Tropfen geführt hat, lassen also den Regenbogen fast weiß erscheinen, während die an der Grenze des Condensationsgebietes liegenden, sehr kleinen Wassertröpfchen nicht nur die Mischfarben der primären, sondern auch noch der secundären Interferenzstreifen zeigen, weshalb man diese auch als „secundäre Regenbogen“ bezeichnet. Mit dem Nachweise, dass die Farbencombination und Lichtvertheilung im Regenbogen von der Größe der Tropfen abhängt, ist auch die Mannigfaltigkeit dieser Naturerscheinung erklärt, welche sich durch das Brechungsgesetz allein nicht begründen lässt.



Alphabetisches Inhaltsverzeichnis.